PHILIPS

Electronic Components and Materials

NOTE DI APPLICAZIONE 5

UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA SOLARE MEDIANTE PANNELLI A CELLE FOTOVOLTAICHE

EDIZIONI PHILIPS/ELCOMA

Questo volume è in vendita presso:

«LIBRERIA INTERNAZIONALE RUSCONI»
Via Vitruvio, 43 - 20124 MILANO - Tel. (02) 2710016

«EDIZIONI CELI»
Via Gandino, 1 - 40137 BOLOGNA - Tel. (051) 391755

«EDIS»
Via Angelo della Pergola, 11 - 20159 MILANO - Tel. (02) 603407

utilizzazione dell'energia solare mediante pannelli a celle fotovoltaiche

Edizioni PHILIPS/Elcoma

Negli opuscoli mensili « Note di Applicazione » vengono presentati, in forma estremamente semplice, progetti completi riguardanti l'applicazione pratica dei nuovi componenti (attivi e passivi) che la Philips-Elcoma viene via via offrendo all'attenzione dei progettisti elettronici. I componenti e le relative applicazioni riguardano sia il settore consumer che quello professionale.

Dato il crescente interesse con il quale questo tipo di pubblicazione è stata accolta dai progettisti operanti nei suddetti settori, abbiamo creduto opportuno riunire in volumi separati i fascicoli che trattano applicazioni riguardanti un determinato settore.

È così nata una serie di volumi che avranno i seguenti titoli:

- **Amplificatori VHF/UHF a componenti discreti e a circuiti integrati ibridi**
- **Amplificatori B.F. e Hi-Fi a componenti discreti e a circuiti integrati monolitici e ibridi**
- **Interruttori statici e regolatori di potenza**
- **Alimentatori stabilizzati a commutazione. Principio di funzionamento, esempi pratici, formule e grafici per il progetto del trasformatore**
- **Utilizzazione dell'energia solare mediante pannelli a celle fotovoltaiche**

Edizione a cura dell'Ufficio Documentazioni Tecniche della Sezione Elcoma della Philips S.p.A. - Piazza IV Novembre, 3 - 20124 MILANO

Redattore: **Lodovico Cascianini**

Impaginazione: **Franco Toselli**

I dati, i disegni, le descrizioni ed i progetti contenuti in questo volume hanno carattere informativo, e pertanto resta esclusa a priori qualsiasi nostra responsabilità per una loro eventuale insufficienza, incompletezza o inesattezza. Quanto riportato non esonera dall'obbligo di premunirsi per iscritto di eventuali occorrendi brevetti o licenze preesistenti. La riproduzione parziale o completa dei singoli articoli è ammessa purchè venga citata per esteso la fonte.

1ª Edizione, Giugno 1980

PREFAZIONE

La soluzione del problema della ricerca delle cosiddette "energie alternative" sta impegnando i laboratori di studio e di ricerca di tutto il mondo. È infatti l'energia proveniente dal sole sotto le sue più svariate forme che dovrà in futuro sostituire quella che il sole medesimo immagazzinò nelle viscere della terra, sotto forma di carbone e di petrolio, milioni di anni fa. Tra tutte le forme d'energia solare attualmente allo studio, quella ricavata dalle celle al silicio, basate sull'effetto fotovoltaico, è quella che dal punto di vista del rendimento e del costo è apparentemente la meno economica. È l'unica comunque che consente di trasformare direttamente l'energia solare in energia elettrica. È l'unica utilizzata per l'alimentazione delle apparecchiature a bordo di satelliti e navi spaziali ed è l'unica economicamente valida in alcuni impieghi illustrati in questo opuscolo.

La Philips, tramite i laboratori di elettronica e di fisica applicata della consociata francese La Radiotechnique Compelec (R.T.C.) ha studiato, realizzato e messo in commercio fin dal lontano 1960 pannelli solari con celle fotovoltaiche al silicio.

Il primo generatore solare fotovoltaico con potenza di 88 W venne infatti installato nel Cile proprio in quell'anno; da allora, anche sotto la spinta della crisi energetica del 1973, si sono succedute cinque generazioni di pannelli a celle fotovoltaiche.

Negli ultimi tipi, e cioè nel BPX 47B/18 e nel BPX 47C/36, si è fatto tesoro dell'esperienza acquisita sia in sede costruttiva che nel funzionamento pratico dell'ormai famoso BPX 47A, attualmente installato nelle più disparate zone della terra.

La sempre più pressante richiesta di notizie e di informazioni sui nostri pannelli a celle fotovoltaiche ci ha indotti a riunire in questo fascicolo le "Note di Applicazione" più significative già da noi pubblicate su questo argomento. A queste abbiamo aggiunto due monografie originali della nostra consociata R.T.C. La prima è una preziosa raccolta di regole e di suggerimenti per il corretto impiego dei nostri pannelli solari. Tutti i riferimenti vengono fatti al BPX 47/A, disponibile attualmente fino ad esaurimento dello stock. Tali raccomandazioni e regole valgono, tenendo in debito conto dei loro dati caratteristici, anche per i nuovi pannelli BPX 47B/18 e BPX 47C/36. La seconda monografia dà una interessante panoramica degli impianti tuttora in funzione, realizzati con i pannelli descritti. È la parte, a nostro giudizio, più importante in quanto, dando di ogni applicazione, i valori di irradiazione solare e di potenza elettrica ricavata con un dato numero di pannelli, rappresenta già una guida per l'utilizzatore evitandogli sgradevoli sorprese.

Il volume termina, com'è nello spirito di queste raccolte, con i "data sheets" dei pannelli solari Philips/Elcoma.

Lodovico Cascianini

Ufficio Documentazioni Tecniche

SOMMARIO

BPX 47B/18 e BPX 47C/36: nuovi pannelli a celle solari pag. 7

Progettazione e installazione di impianti per lo sfruttamento dell'energia solare basati sull'impiego dei pannelli solari Philips/Elcoma » 15

Due esempi di progettazione di impianti a pannelli solari » 26

REGOLE PRATICHE PER IL CORRETTO IMPIEGO DEI PANNELLI SOLARI

Definizioni, simboli e richiami di astronomia » 42

Il modulo BPX 47A » 45

Generatori solari con batteria » 59

Generatori solari senza batteria » 81

Conclusione » 85

Relazione tra superficie dei pannelli e numero di accumulatori impiegati » 89

ESEMPI D'IMPIEGO

Nel settore delle telecomunicazioni » 112

Per la realizzazione di radio-fari » 118

Per la realizzazione di segnalazioni luminose » 120

Nel settore della didattica » 122

Nei sistemi di pompaggio dell'acqua » 124

Nelle imbarcazioni a vela da competizione e da diporto » 126

Nei sistemi di avvistamento » 128

DATA SHEETS

BPX 47C/36 » 133

BPX 47B/18 » 135

BPX 47A » 137

Allegati: una carta geografica della terra indicante la distribuzione media annuale dell'energia solare in kJ/cm^2

BPX 47B/18 e BPX 47C/36: nuovi pannelli a celle solari

Dopo il BPX 47A, la Philips/Elcoma presenta una nuova serie di pannelli solari con potenza d'uscita di 16,5 W (BPX 47B/18) e 33 W (BPX 47C/36). La maggiore potenza è stata ottenuta grazie al maggior diametro delle singole celle (100 mm) e ai progressi tecnologici introdotti nell'incapsulamento delle singole celle; ciò ha permesso di ridurre il riscaldamento delle celle e di aumentarne pertanto il rendimento (12%).

IL SOLE: PRODIGIOSA SORGENTE DI ENERGIA

E' il sole che mantiene la vita sulla terra. Esso ci invia un'enorme quantità di energia principalmente sotto forma di luce e di calore. Senza il sole non esisterebbe sulla terra la vita, almeno come noi la conosciamo. L'energia solare è prodotta da una reazione atomica detta *fusione nucleare*, è cioè una bomba all'idrogeno in continua esplosione. Il sole è formato essenzialmente da elio e da idrogeno; può considerarsi una gigantesca pentola a pressione. La pressione è prodotta dalla forza di gravità solare mentre la pressione termonucleare produce il calore. All'interno del sole la temperatura raggiunge i 20 milioni di gradi centigradi, la pressione centinaia di milioni di tonnellate per mm^2. In queste condizioni, gli atomi vengono ionizzati e i loro elettroni formano un gas molto denso. L'energia viene prodotta in seguito alla graduale distruzione della massa stessa del sole; ogni secondo ne vengono distrutte 4,3 tonnellate e vengono trasformate in elio 600 milioni di tonnellate di idrogeno. Nonostante questa graduale autodistruzione, il sole continuerà ad inviare energia sulla terra per almeno altri 10 miliardi di anni!

La radiazione solare complessiva intercettata dalla terra s'aggira sui 173×10^{12} kW, valore quest'ultimo 150.000 volte maggiore dell'attuale consumo di energia sulla terra. Siccome la terra non diventa progressivamente più calda, è evidente che essa riirradia gran parte dell'energia che riceve. *L'uomo deve cercare di intrappolare questa energia prima che essa venga irradiata di*

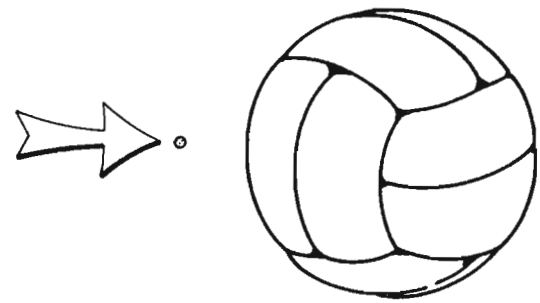


Fig. 1 - Dimensioni della terra e del sole. Supponendo che il sole abbia le dimensioni di un pallone da football, in proporzione la terra assumerebbe le dimensioni di una capocchia di uno spillo.

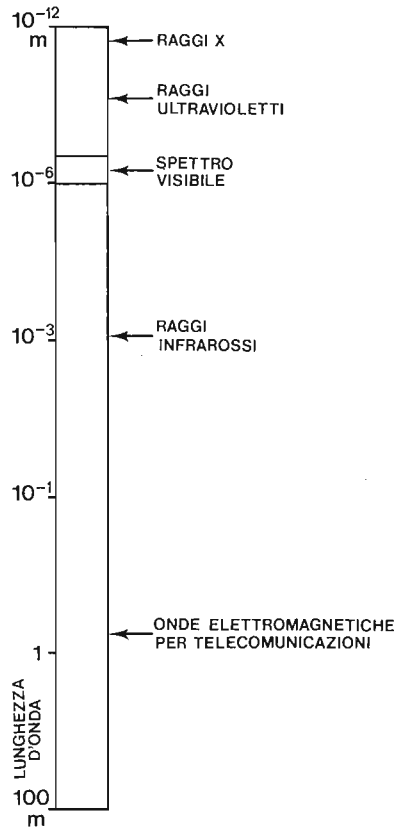


Fig. 2 - Spettro di tutte le radiazioni che la terra riceve dal sole. Si noti quanto ridotta sia la gamma delle radiazioni visibili.

nuovo. Si pensi che se si potesse catturare l'energia solare che investe lo 0,5% del territorio degli Stati Uniti, questa soddisferebbe ai bisogni energetici che gli U.S.A. avranno nel 2000!

FORME ASSUNTE SULLA TERRA DALL'ENERGIA SOLARE

Abbiamo detto che la maggior parte dell'energia che il sole manda sulla terra viene riirradiata sotto forma di calore. In una giornata serena, è stato calcolato che su ogni metro quadro di superficie, la terra riceve 1 kW di energia. Circa il 30% di questa energia (e cioè 52 × 10^{12} kW) viene nuovamente riflessa mentre il 47% (e cioè 81 × 10^{12} kW) viene trasformata in calore. Siccome però la temperatura della terra non aumenta, evidentemente questo calore viene riirradiato, ed è questo il motivo per cui la terra mantiene l'equilibrio termico attuale.

Il ciclo evaporazione/pioggia assorbe un altro 23% di energia solare (e cioè 40 × 10^{12} kW) mentre per la formazione dei venti, delle correnti e delle onde marine ne viene speso circa 1/4% (e cioè 0,37 × 10^{12} kW).

L'energia solare immagazzinata nelle piante grazie al processo di fotosintesi è veramente trascurabile se paragonata ai fenomeni sopradescritti: essa infatti ammonta a meno dello 0,025% (e cioè 0,04 × 10^{12} kW). Paradossalmente, l'energia che attualmente ricaviamo dal carbone, dal petrolio e dal metano non è altro che l'accumulo, nel corso di milioni di anni, di questa insignificante quantità di energia che le piante hanno carpito al sole grazie al processo di fotosintesi.

Le uniche forme di energia "immanenti" e cioè provenienti esclusivamente dalla terra (energia geotermica) sono quelle delle maree (0,003 × 10^{12} kW) e dei moti di convezione dei vulcani, dei soffioni caldi (0,0003 × 10^{12} kW).

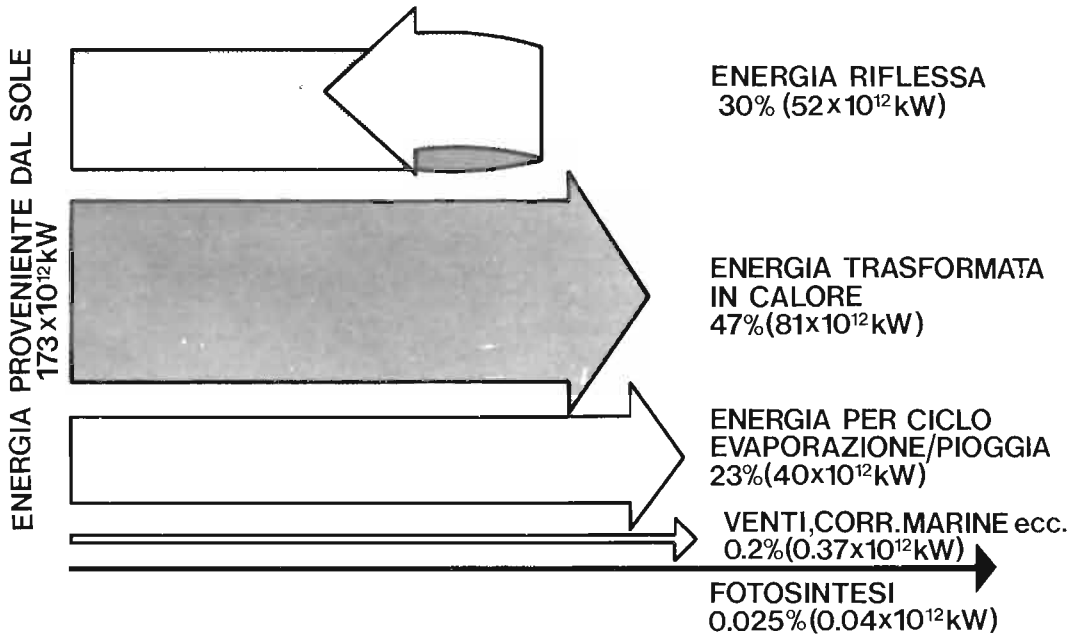


Fig. 3 - Varie forme assunte dall'energia solare sulla terra. Per il mantenimento dell'attuale equilibrio termico della superficie terrestre occorre che una buona parte dell'energia solare venga riirradiata.

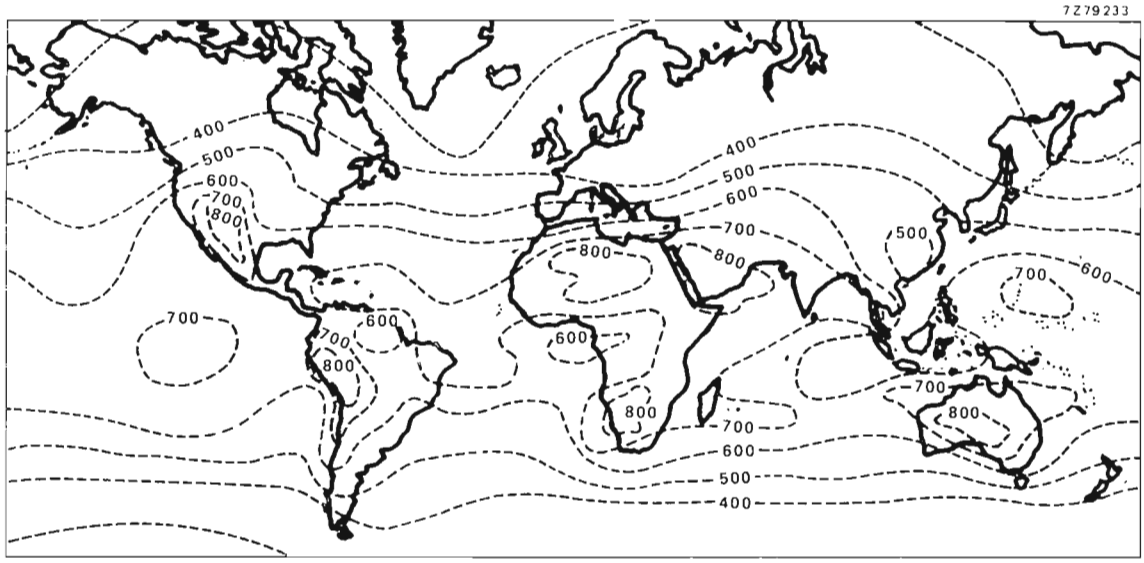


Fig. 4 - Distribuzione annuale media dell'energia solare (in kJ/cm²) sulla superficie terrestre.

Inevitabilmente, prima o poi i giacimenti di carbone, di petrolio e dei gas naturali (metano) si esauriranno. L'attuale crisi energetica lo dimostra. Si pone quindi per l'uomo il problema incombente, se vuole mantenere l'attuale ritmo di sviluppo industriale, trovare dei sistemi per ricavare *direttamente* dal sole l'energia che gli occorre.

ALCUNI SISTEMI DI SFRUTTAMENTO DELL'ENERGIA SOLARE

Soffermiamoci per un momento sul sistema di sfruttamento dell'energia solare già in atto da tempo: e cioè quello basato sul ciclo naturale evaporazione dell'acqua/pioggia (impianti idroelettrici). Riconsideriamo brevemente il funzionamento di un impianto idroelettrico. Il sole riscalda la superficie del mare e quella dei laghi producendo evaporazione, e quindi formazione di nuvole. Il vento spinge le nuvole verso gli strati alti dell'atmosfera dove la temperatura più fredda trasforma le nuvole in pioggia. In pratica quindi il sole non fa altro che portare l'acqua del mare e dei laghi ad un livello più elevato (bacini naturali o artificiali). Le turbine degli impianti idroelettrici sono appunto messe in moto dalla forza viva che l'acqua sviluppa nel passare da un livello più alto ad un livello più basso (forza di gravità).

In Europa e nell'America del Nord, questa trasformazione di energia meccanica in energia elettrica è sfruttata nella sua quasi totalità. Grandi possibilità di sfruttamento esistono ancora in Africa, nell'America del Sud e nell'Asia Sud Orientale.

L'energia del vento è un'altra forma di energia solare. La terraferma, lungo le coste, a parità di irradiazione solare, assume una temperatura superiore a quella del mare. L'aria che si trova sopra la terraferma acquisterà pertanto una temperatura superiore a quella a contatto con la superficie del mare. L'aria calda tenderà a salire e verrà rimpiazzata dall'aria proveniente dal mare. La forza del vento trae origine da questi moti di convezione dell'aria.

Tabella 1 - ALCUNI DATI SUL SOLE E SULLA TERRA

	Sole	Terra
Raggio	$6{,}96 \times 10^5$ km	$6{,}378 \times 10^4$ km
Massa	$1{,}99 \times 10^{30}$ kg	$5{,}97 \times 10^{24}$ kg
Temperatura sulla superficie	5500 °C	25 °C
Distanza	$1{,}496 \times 10^8$ km	

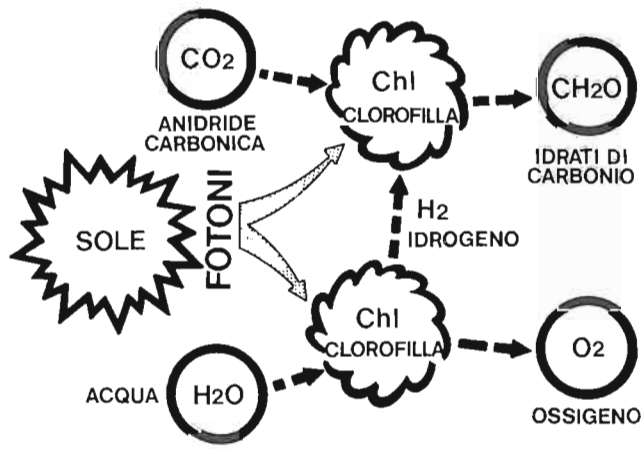


Fig. 5 - Illustrazione schematica del processo di fotosintesi. Questo processo non è stato ancora chiarito in tutte le sue fasi. Si pensa comunque che partendo dall'acqua (H_2O) e dall'anidride carbonica (CO_2), la clorofilla presente nelle foglie, sotto l'azione della luce solare e di particolari enzimi, formi idrati di carbonio (CH_2O) e liberi ossigeno (O_2).

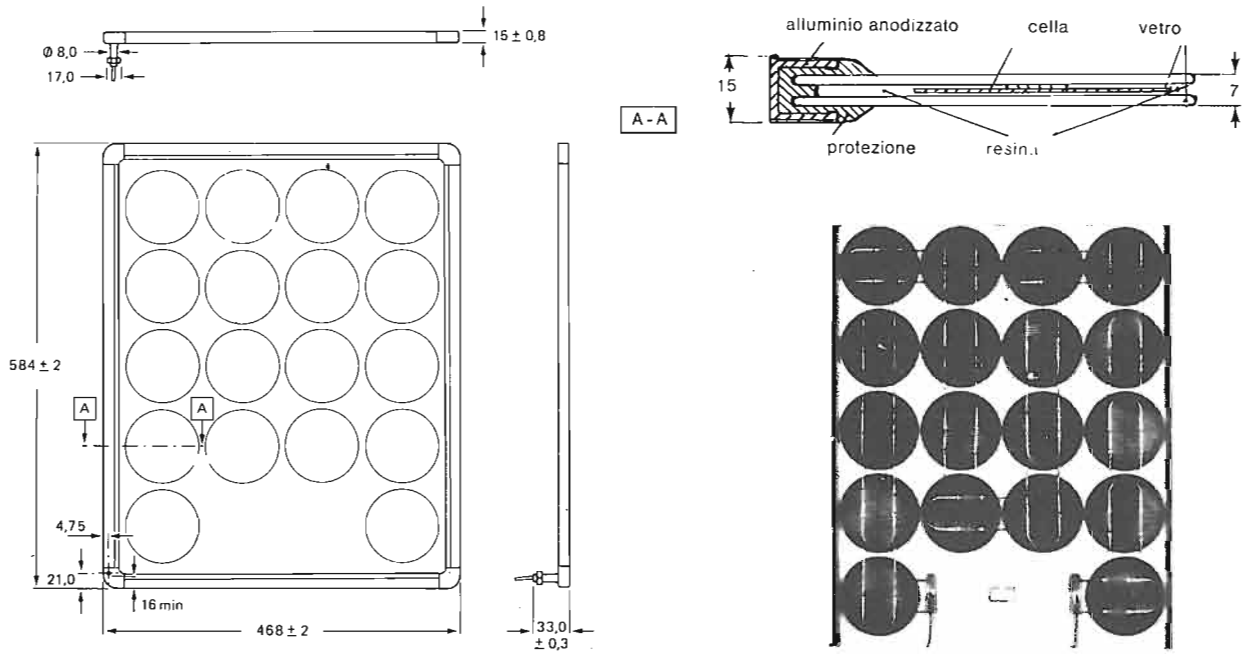


Fig. 6 - Fotografia e dimensioni d'ingombro del pannello solare BPX 47B/18.

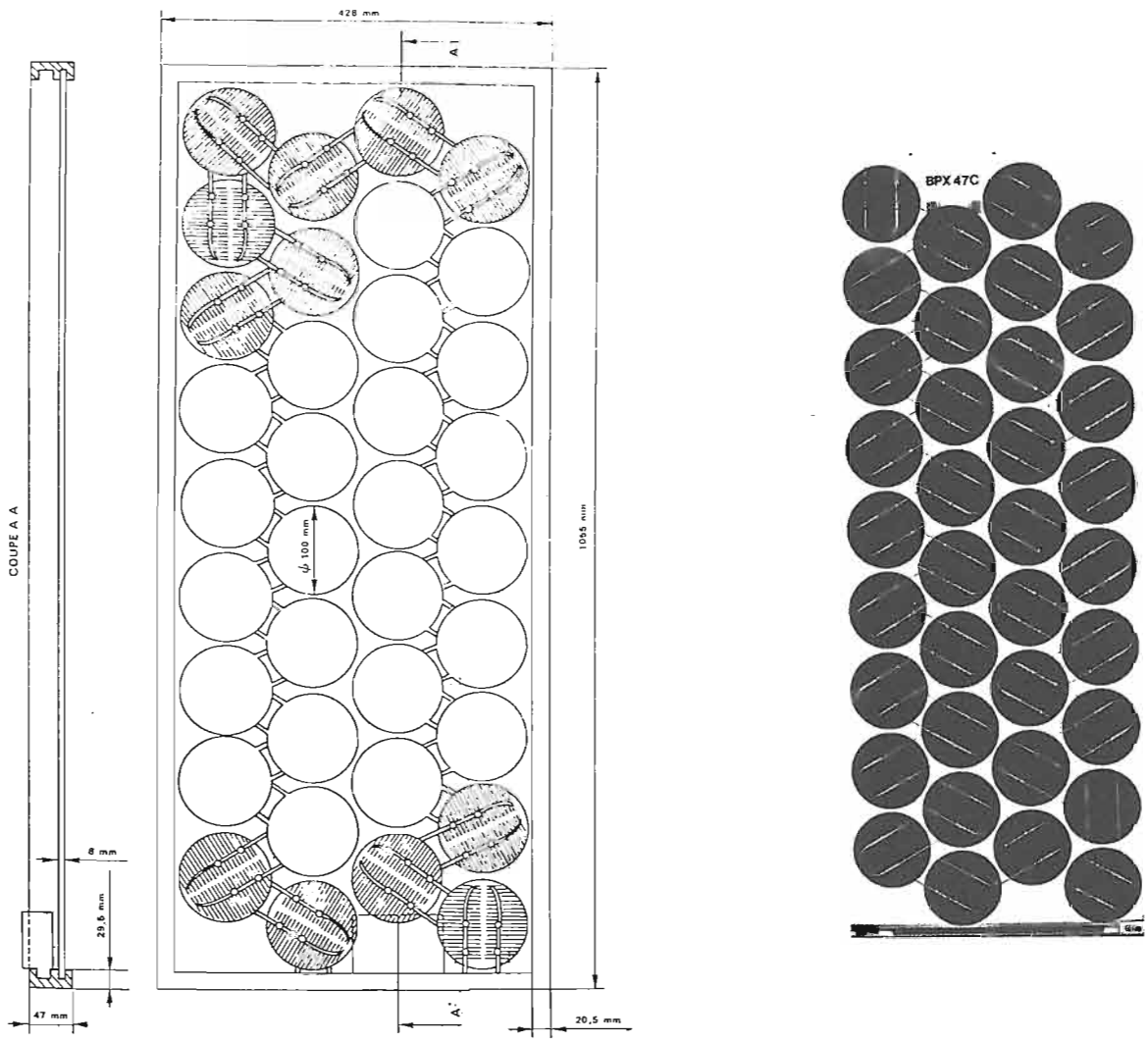


Fig. 7 - Fotografia e dimensioni d'ingombro del pannello solare BPX 47C/36

In Danimarca e in Ungheria sono stati installati fin dai primi anni di questo secolo generatori eolici (i cosiddetti mulini a vento) capaci di fornire potenze fino a 200 kW. Negli USA è stato realizzato un "mulino a vento" sperimentale con un'elica di 40 mt. di diametro, sistemata ad un'altezza di 30 mt. Con il vento con intensità di 30 km/h, la potenza sviluppata è 100 kW.

FOTOSINTESI E IDRATI DI CARBONIO

L'unica forma di energia del sole già immagazzinata sulla terra è quella realizzata dalle piante con il processo di fotosintesi. Questo processo, con il concorso della luce del sole e della clorofilla, riesce a formare partendo da composti inorganici, composti organici e contemporanea liberazione di ossigeno.

Il processo di fotosintesi è alla base della formazione di tutta la materia vivente e pertanto della vita sul nostro pianeta. E' un processo esclusivo delle piante e qualsiasi forma di energia vitale dipende da esso.

Gli idrati di carbonio sono gli elementi - base di tutte le piante. Il carbone e il petrolio non sono altro che piante e in genere vegetali, fossilizzati e pertanto, per quello che abbiamo sopra detto, non sono altro che energia solare immagazzinata nelle viscere della terra.

In normali condizioni, una pianta estirpata o tagliata si decompone. Ma milioni di anni fa, questa decomposizione venne impedita in alcune parti del globo, (non sappiamo bene da quali fattori), e di conseguenza, piante vitali rimasero sepolte sotto spessi strati di sabbia e di fango. Si formò così la torba, la quale sottoposta alle forti pressioni degli strati terrestri perse l'umidità e diventò lignite, indi carbone bituminoso che riscaldato dall'azione dei vulcani, diventò l'attuale carbone oppure antracite. Che il carbone provenga dalle piante è fuori discussione in quanto ancora oggi è facile trovare in esso piante fossilizzate.

Differente è invece l'origine del petrolio. Si pensa infatti che esso sia stato prodotto da piante marine o da animali attaccati da batteri sotto strati di sabbia e di fango. Questi materiali organici, sotto l'azione di forti pressioni, formarono lo schisto, che ulteriormente compresso formò l'attuale petrolio.

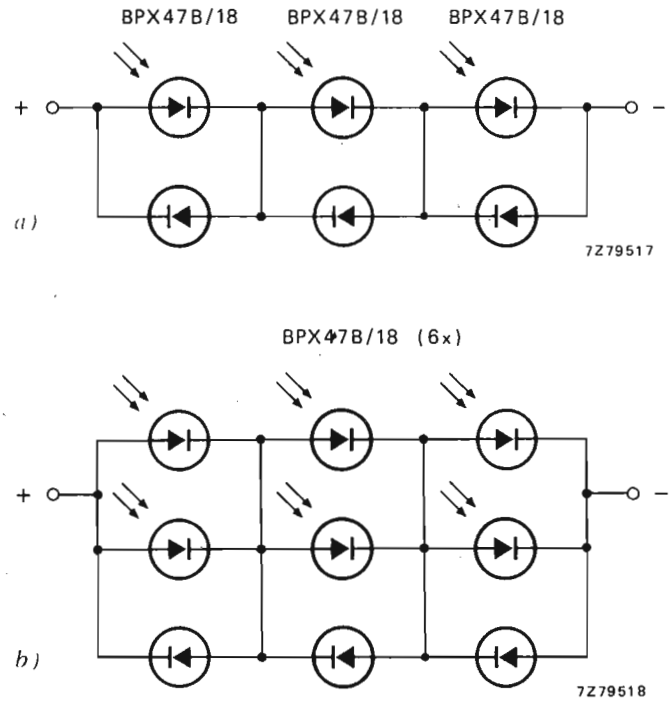


Fig. 8 - Sistemi di collegamento dei pannelli

a) COLLEGAMENTO IN SERIE. Occorre in questo caso collegare ai morsetti d'uscita di ciascun pannello un diodo di protezione. Ciò impedisce l'inversione della tensione nel caso in cui il pannello rimanesse parzialmente in ombra

b) COLLEGAMENTO IN PARALLELO. Quando più catene di pannelli collegati in serie e muniti di diodo di protezione vengono collegate in parallelo, occorre effettuare un'interconnessione a matrice.

Stime attendibili affermano che tra 300 anni circa l'attuale giacenza di carbone sarà esaurita; e pensare che occorsero 600 milioni di anni per formarla! Si pensa che una certa riformazione sia ancora in atto; occorrerebbe comunque un altro milione di anni per darci una quantità di carbone che soddisferebbe ai nostri bisogni solo per 6 mesi!

Tabella 2 - DATI CARATTERISTICI PRINCIPALI DEI PANNELLI

	Dimensioni (mm)	Peso (kg)	Temperatura alla giunzione delle celle * = 25 °C; Irradiazione solare = 1 kW/m²				
			Tensione a circuito aperto (V)	Corrente di corto circuito (A)	Corrente alla massima potenza (A)	Tensione alla massima potenza (V)	Potenza massima (W)
BPX 47A**	468 × 365 × 15	2,4	20,5	0,72	0,7	15,5	11
BPX 47B/18	584 × 468 × 15	4	10,5	2,1	2,01	8,2	16,5
BPX 47C/36	1055 × 428 × 47	11	21,2	2,1	2,01	16,4	33

(*) Temperatura alla giunzione delle celle ≈ temperatura ambiente + 15 °C
(**) Fino ad esaurimento dello stock

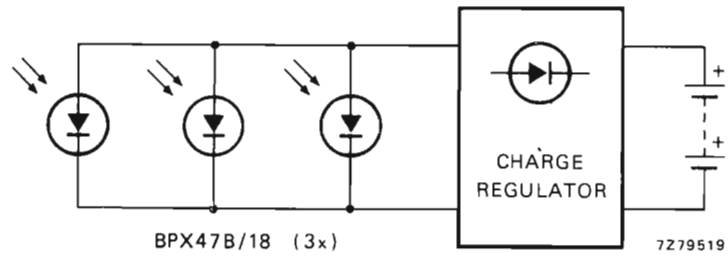


Fig. 9 - Quando come batteria-tampone viene usato un accumulatore al piombo, i pannelli dovranno essere collegati ad esso tramite un regolatore di carica munito di diodo di protezione.

LA CELLA SOLARE

Le considerazioni sull'importanza e sull'entità delle forme di energia solare a cui abbiamo accennato in precedenza, ci portano all'argomento principale che vogliamo trattare e cioè *la cella solare*, la quale attualmente è l'unico dispositivo capace di trasformare direttamente l'energia solare in energia elettrica. Dati i costi ancora elevati, essa viene di regola impiegata (pannelli solari) in quei luoghi nei quali il trasporto dell'energia elettrica mediante le convenzionali reti di distribuzione non risulterebbe economico.

Questi pannelli di celle solari, muniti di batterie-tampone, (le quali, com'è noto, servono a fornire energia quando il sole non c'è) sono in grado di produrre in modo continuo potenze dell'ordine di centinaia di watt.

Attualmente essi sono usati:

— nelle stazioni meteorologiche situate in luoghi inaccessibili
— nei telefoni d'emergenza installati lungo le autostrade e nei parchi nazionali
— per l'azionamento delle pompe di irrigazione nelle regioni aride e assolate
— nei ripetitori di piccola potenza per telecomunicazioni
— nei fari e nelle boe marine.

I pannelli solari sono formati da singole celle del diametro da 25 a 100 mm collegate in serie. Le celle non sono altro che *fotodiodi* tecnologicamente realizzati in maniera da trasformare, grazie all'effetto fotovoltaico l'energia solare in energia elettrica. Ogni cella è costituita infatti da una giunzione P/N. All'atto della formazione di ogni giunzione, si forma, com'è noto, al di qua e al di là di essa, una zona priva di cariche. I fotoni incidenti producono in questa zona coppie di elettroni/lacune che vengono successivamente portate ai reofori dall'azione del potenziale di contatto. Di regola, ogni cella fornisce a circuito aperto e alla massima irradiazione una tensione fotovoltaica di 0,6 V e, in cortocircuito, una corrente di circa 690 mA.

In condizioni di valori di irradiazione solare standard, e cioè 1 kW/m², il rendimento di conversione di una cella solare è circa il 12%. Esso è limitato essenzialmente da tre fattori:

I — di tutto l'intervallo dello spettro compreso tra 0,2 e 4 μm viene utilizzata solo la parte compresa tra 0,4 e 1,1 μm

II — i fotoni assorbiti posseggono uno straordinario eccesso di energia

III — alcune coppie di elettroni-lacune vengono formate al di fuori della regione della giunzione, e la loro ricombinazione ha luogo prima della loro separazione, che come già detto, dà luogo alla corrente fotovoltaica.

NUOVI PANNELLI SOLARI

Mentre viene tuttora impiegato l'ormai noto BPX 47A, la Philips/Elcoma sta introducendo sul mercato altri due nuovi pannelli solari: *il BPX 47B/18* e il *BPX 47C/36* formati rispettivamente con 18 e 36 celle. Ciascuna cella ha un diametro di 100 mm (57 mm nel BPX 47A) ed è in grado di fornire con una insolazione di 1 kW/m², 900 mW, con un rendimento complessivo del 12%. Nelle figure 6 e 7 sono riportate fotografie e dimensioni d'ingombro dei nuovi pannelli solari BPX 47B/18 e BPX 47C/36.

Il vetro del pannello di rivestimento ha una durezza maggiore (30% in più rispetto a quello del BPX 47A) e 5 volte meno fragile. Ciò riveste particolare importanza nel caso gli impianti a pannelli vengano installati nelle zone desertiche, con burrasche di sabbia. La superficie esterna della piastra di vetro è stata trattata chimicamente in modo da risultare estremamente levigata così da impedire che vengano trattenuti sulla superficie sabbia o neve.

Abbiamo detto che le celle hanno un rendimento energetico del 12%; ciò significa che l'80% circa delle radiazioni incidenti vengono trasformate non in energia elettrica ma in calore; quest'ultimo, riscaldando le giunzioni P/N delle singole celle abbasserebbe la potenza resa, dato che ad un aumento di temperatura della giunzione corrisponde, com'è noto, una diminuzione della tensione fotovoltaica. Per il BPX 47B, per esempio, questa diminuzione s'aggira sui 36 mV/°C.

L'introduzione della tecnologia d'incapsulamento delle celle cosiddetta a *doppio vetro* (e cioè vetro + substrato trasparente) ha consentito di abbassare la temperatura di lavoro delle celle mantenendola 15 °C al di sotto della temperatura ambiente. Pertanto, siccome la massima temperatura ammessa alla giunzione è 85 °C, questa particolare tecnologia consentirà alle celle di lavorare egregiamente anche con temperature ambiente di 70 °C.

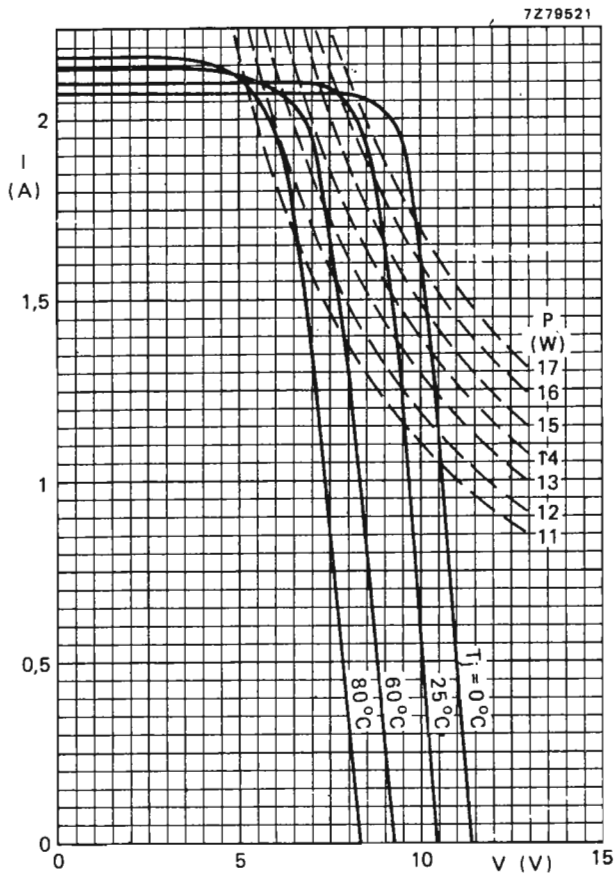


Fig. 10 - Correnti (A) e tensioni (V) fornite dal BPX 47B/18 a differenti valori della temperatura alla giunzione delle celle e con valore di insolazione E = 1 kw/m

Fig. 11 - Correnti (A) e tensioni (V) fornite dal BPX 47B/18 a differenti valori di insolazione (Ee) con temperatura alla giunzione delle celle Tj = 60 °C

Pannello di vetro e substrato vengono tenuti assieme da una robusta cornice di alluminio che permette di montare i pannelli direttamente sulle intelaiature previste.

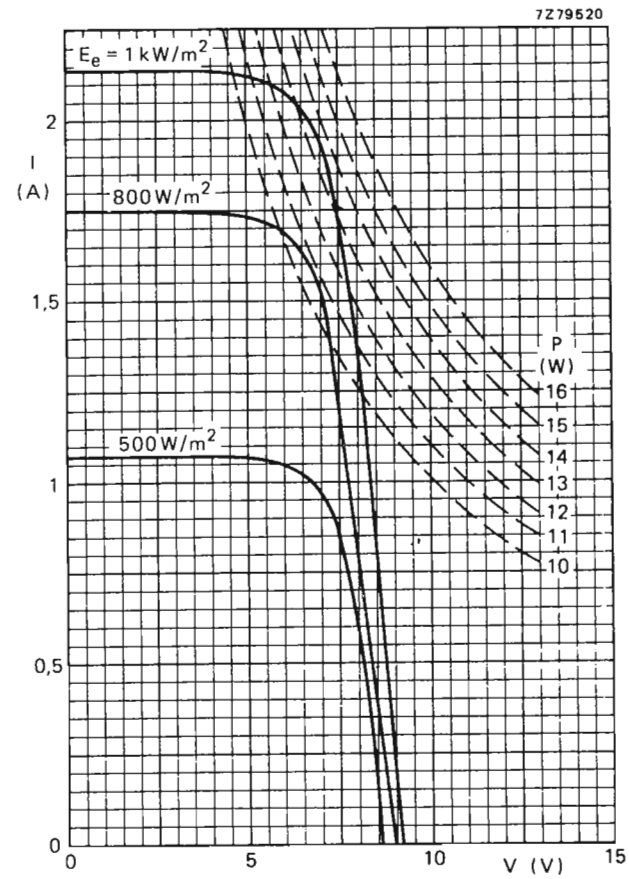
Il pannello *BPX 47B/18* è formato da 18 celle con diametro di 100 mm collegate in serie. Ha dimensioni di 584 × 468 × 15 mm. Pesa 4 kg. A 25 °C e con una insolazione di 1 kW/m², fornisce una tensione di 8,2 V ed una corrente di 2,01 A. La potenza d'uscita è 16,5 W. Il particolare valore della tensione di uscita consente di collegarlo direttamente ad un accumulatore-tampone da 6 V.

Il pannello *BPX 47C* è formato da 36 celle con diametro di 100 mm collegate in serie. Le sue dimensioni sono: 1055 × 428 × 47, il peso è 9,2 kg. A 25 °C, e con insolazione di 1 kW/m², dà una tensione di 16,4 V ed una corrente di 2,01 A. La potenza è 33 W.

Il "vecchio" pannello *BPX 47A* è formato da 34 celle con diametro di 57 mm collegate in serie. Le sue dimensioni sono 468 × 365 × 15 mm, il peso è 2,4 kg. A 25 °C e con insolazione di 1 kW/m², la sua tensione d'uscita è 15,5 V e la corrente 700 mA. La potenza è 11W.

Dovendo impiegare come batteria-tampone un accumulatore da 12 V converrà usare il pannello BPX 47A, il quale è pertanto molto adatto per piccoli impianti (barche, roulotte, tende ecc...)

Per evitare che l'accumulatore venga sovraccaricato, e pertanto per evitare che l'elettrolita entri in ebolizione vengono usati regolatori di carica muniti di diodo di protezione (fig. 9).



Conclusione

I pannelli solari, prodotti dalla Philips/Elcoma sono da tempo installati negli impianti di recupero dell'energia solare che ormai si trovano in tutte le parti del mondo. Nelle pagine precedenti abbiamo riportato le fotografie di quelli più significativi unitamente ai dati tecnici essenziali.

S'impone a questo punto questa considerazione. Il primo impianto a pannelli solari Philips venne installato all'Università di Santiago (Cile). La potenza era 87,5 W. Serviva per alimentare un bagno per l'elettrolisi del rame. Nel 1978 venne installato in Australia un sistema di pannelli solari BPX 47A con potenza fino a 10 kW. Il sistema serviva per alimentare 13 ripetitori per telecomunicazioni per una tratta di 580 km. Gli attuali 10 kW contro i lontani 87,5 W dimostrano che il ricupero dell'energia solare mediante celle al silicio può raggiungere potenze sempre più grandi ed inoltre che con il miglioramento delle tecnologie di produzione delle celle al silicio, il costo attualmente abbastanza elevato dei pannelli solari è destinato sicuramente a diminuire. Questo è un fatto su cui si può contare dato che si è verificato puntualmente con tutti i tipi di dispositivi a semiconduttori, circuiti integrati compresi.

Progettazione e installazione di impianti per lo sfruttamento dell'energia solare basati sull'impiego dei pannelli solari Philips/Elcoma

In alcuni casi, l'energia solare, trasformata in energia elettrica mediante celle solari, sta sostituendo vantaggiosamente l'energia elettrica ottenuta con i sistemi convenzionali. Questo articolo illustra il funzionamento e la costruzione delle celle fotovoltaiche, dei pannelli solari e alcune loro caratteristiche applicazioni. Ci si sofferma anche sui principali fattori che devono essere presi in esame in sede di progetto di un impianto a pannelli. Vengono infine illustrate nella seconda parte le caratteristiche che devono avere la batteria-tampone, il regolatore di carica e alcuni circuiti di azionamento per motori. Nell'appendice si forniscono i dati tecnici essenziali dei nuovi pannelli Philips/Elcoma destinati a sostituire il BPX 47A.

1. - INTRODUZIONE

Lo sfruttamento dell'energia solare può attualmente considerarsi l'unico sistema di produzione dell'energia in tutte quelle parti del mondo nelle quali non è disponibile una rete di distribuzione dell'energia elettrica e in tutti quei casi nei quali i sistemi convenzionali di produzione dell'energia elettrica assumerebbero costi proibitivi.

Questi generatori di energia elettrica, ricavata dall'energia solare sono, costituiti da batterie di *celle solari* collegate in combinazioni serie / parallelo (fig. 1). Le celle, la cui superficie s'aggira sui 25 cm^2 circa,° non sono altro che *fotodiodi* tecnologicamente realizzati in maniera da trasformare, grazie all'effetto fotovoltaico, l'energia solare in energia elettrica. Di regola, ogni cella fornisce, a circuito aperto, una tensione di 0,6 V, e in corto circuito, una corrente di circa 690 mA.

Questi sistemi di celle solari, muniti di batterie-tampone, (le quali, com'è noto, servono a fornire energia quando il sole non c'è) sono in grado di produrre in modo continuo potenze dell'ordine di centinaia di watt. L'impiego di questi impianti sta estendendosi sempre di più in tutto il mondo.

° BPX 47A

Essi sono attualmente usati:

- nelle stazioni meteorologiche situate in luoghi inaccessibili
- nei telefoni d'emergenza installati lungo le autostrade e nei parchi nazionali
- per l'azionamento delle pompe di irrigazione nelle regioni aride e assolate
- nei ripetitori di piccola potenza per telecomunicazioni
- nei fari e nelle boe marine.

Queste sono solo alcune tipiche applicazioni già in atto. Esse, come già detto, sono destinate ad aumentare di giorno in giorno. Per esempio, tra Alice Springs e Tennant Greek, in Australia, è stato installato un ponte radio a microonde, per una tratta di 580 km, nel quale 13 ripetitori alimentati con sistemi di batterie solari sono in grado di attivare complessivamente 3000 circuiti telefonici (fig. 5). In Cile, è in funzione sin dal 1961, un impianto a celle solari per la produzione di rame elettrolitico.

Per il futuro è facile prevedere che questi sistemi di conversione di energia solare in energia elettrica a celle solari potranno competere con i convenzionali

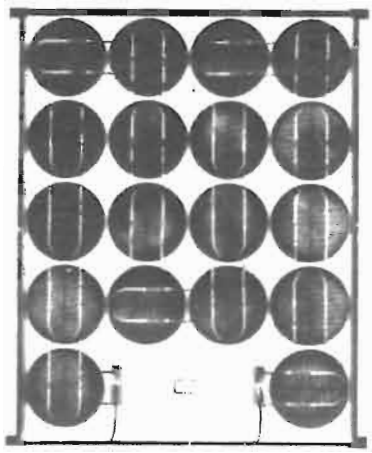


Fig. 1 - Pannello solare BPX 47B-18 (16,5 W)

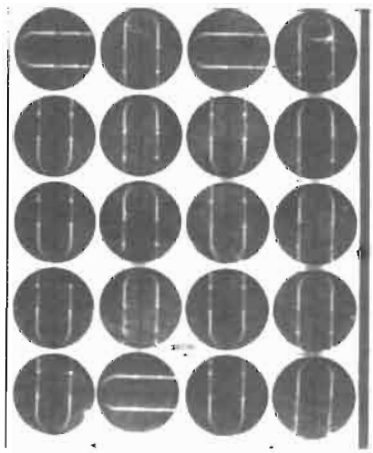


Fig. 2 - Pannello solare BPX 47B-20 (18,3 W)

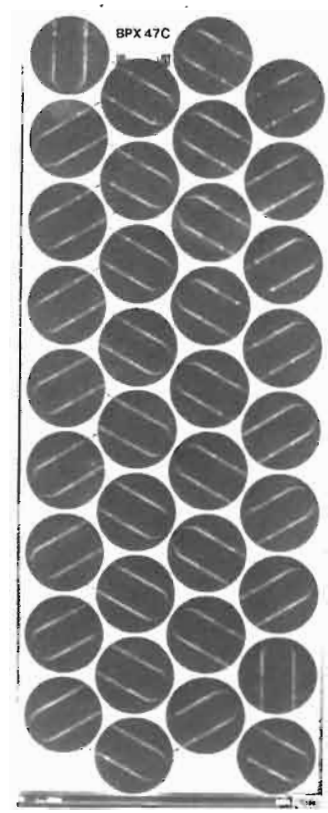


Fig. 3 - Pannello solare BPX 47C (33 W)

AVVERTENZA: a parte le caratteristiche particolari di questi nuovi pannelli (vedi appendice), le considerazioni di carattere generale fatte nel corso di questo articolo sul primo pannello Philips/Elcoma e cioè sul BPX 47A, valgono anche per questa nuova serie.

sistemi di produzione di energia elettrica dato che mentre il costo di quest'ultimi, a causa del continuo aumento del costo del petrolio, tenderà ad *aumentare*, quello dei sistemi a celle solari tenderà sicuramente a *diminuire* a causa sia del continuo incremento della produzione in serie di questi dispositivi sia a causa dei progressi tecnologici che inevitabilmente ne miglioreranno il rendimento attualmente piuttosto basso.

In questo articolo illustreremo innanzitutto il principio di funzionamento e la costruzione di una cella solare, riferendoci in particolare al pannello solare *BPX 47A*, formato da 36 celle solari collegate in serie. Successivamente vedremo i vari sistemi di collegamento di detti pannelli: in serie, in parallelo e in combinazioni serie/parallelo. Infine descriveremo un *generatore solare*, esaminando in particolare le caratteristiche che devono possedere il regolatore di carica, la batteria-tampone e i circuiti di comando di un motore, per esempio.

2. - IRRADIAZIONE SOLARE E BILANCIO ENERGETICO

E' stato calcolato che la terra riceve dal sole un quantitativo di energia pari a $1,73 \times 10^{17}$ W, corrispondenti a 20.000 volte il consumo attuale di energia sulla terra. Siccome la temperatura della terra si mantiene relativamente costante, è da supporre che tutta questa grande quantità di energia che arriva su di essa venga di nuovo irradiata. Effettivamente, il 30% viene riflessa dall'atmosfera mentre il 47% viene convertita in calore ed irradiata a lunghezza d'onda maggiore durante la notte. La maggior parte del rimanente 23% è responsabile dei fenomeni di evaporazione dell'acqua. Una piccola frazione, inferiore allo 0,2% serve alla formazione dei venti, delle onde del mare e dei fenomeni di convezione. Una frazione più ridotta, circa lo 0,025%, viene immagazzinata nelle piante in conseguenza del processo di fotosintesi.

Dell'energia solare, a parte quella immagazzinata dai venti e dall'acqua (bacini idrici), la parte effettivamente sfruttata sin dai tempi più antichi, e che ammonta allo 0,025% appena, è quella immagazzinata nel mondo vegetale (piante) e nei combustibili fossili, e cioè nel carbone e nel petrolio. Siccome però si è calcolato che una estrazione di carbone della durata di 6 mesi richiederebbe, per il suo rimpiazzo, 1 milione di anni, è evidente che questa tradizionale forma di energia solare avrà un limite, non potrà cioè essere sfruttata all'infinito. La stessa cosa, in proporzioni differenti, deve dirsi per il petrolio.

Dell'energia potenziale fornita dal ciclo evaporazione-pioggia si è potuto sfruttare meno del 10%, il rimanente 90% non è praticamente sfruttabile in quanto la maggior parte di questi bacini naturali o artificiali verrebbero a trovarsi molto lontano dalle zone industrializzate dove dovrebbe essere utilizzata.

In conclusione quindi, l'energia fornita dagli impianti idroelettrici, dal carbone, dal petrolio, dal vento, ammonterebbe complessivamente appena il 2% dell'energia fornita dal sole, mentre il rimanente 70% non verrebbe fino ad oggi in alcun modo utilizzato.

3. - SFRUTTAMENTO DELL'ENERGIA SOLARE

Attualmente si stanno studiando due sistemi di sfruttamento dell'energia solare: *la conversione fototermica* e *la conversione fotovoltaica.*

Nella conversione fototermica, la radiazione solare viene usata per riscaldare un liquido sia direttamente sia mediante una pompa di calore (figg. 2 e 3).

Nella conversione fotovoltaica, la radiazione solare viene trasformata *direttamente* in elettricità la quale, ovviamente, potrà essere portata senza difficoltà sul luogo di utilizzazione per essere successivamente trasformata nella particolare forma di energia desiderata. Le *celle solari* non sono altro che convertitori fotovoltaici.

4. - CONVERSIONE FOTOVOLTAICA ATTUATA MEDIANTE CELLE SOLARI

Una cella solare può considerarsi un "diodo" al silicio di grandi dimensioni. In questo diodo, se i terminali non sono collegati tra loro e se si provvede a opportunamente schermarlo, la non omogeneità delle cariche in corrispondenza della giunzione *pn* farà sì che gli elettroni forniti dagli atomi donatori del *gruppo V*, (sistemati nella zona n della giunzione) possano diffondersi, attraversando la giunzione pn, nella zona *p* a bassa densità di elettroni. Questo fenomeno di diffusione di elettroni lascia dietro di se gli atomi donatori della sezione n, sotto forma di ioni positivi, responsabili appunto della carica *positiva* che viene a formarsi in corrispondenza della zona n della giunzione.

Questi elettroni, che si diffondono nella zona *p* riempiono i livelli di valenza creati dagli atomi accettori del *gruppo III*, vengono catturati e immobilizzati, creando a loro volta nei pressi della giunzione, una carica spaziale di polarità *negativa*. In condizioni di equilibrio, questa separazione di cariche produce ai capi della giunzione un *potenziale di diffusione* V_B (figura 4a).

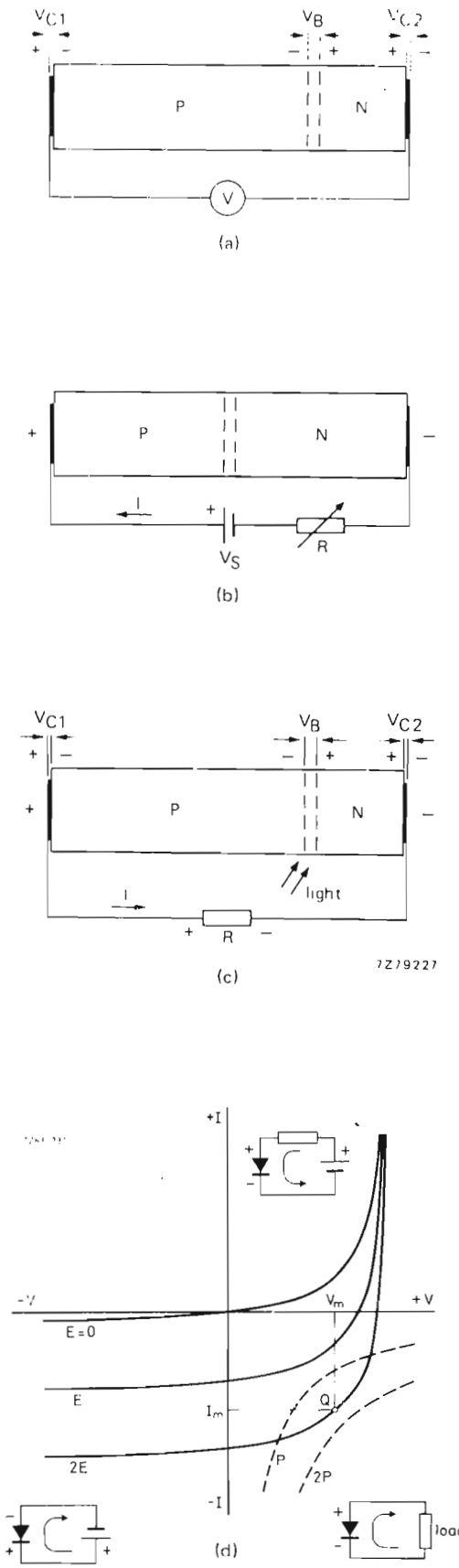


Fig. 4 - Principio di funzionamento di una cella solare:
(a) potenziali di barriera e potenziali di contatto in una cella solare non irradiata
(b) normale conduzione in un diodo
(c) produzione di corrente fotovoltaica in una cella irradiata
(d) curve caratteristiche del diodo

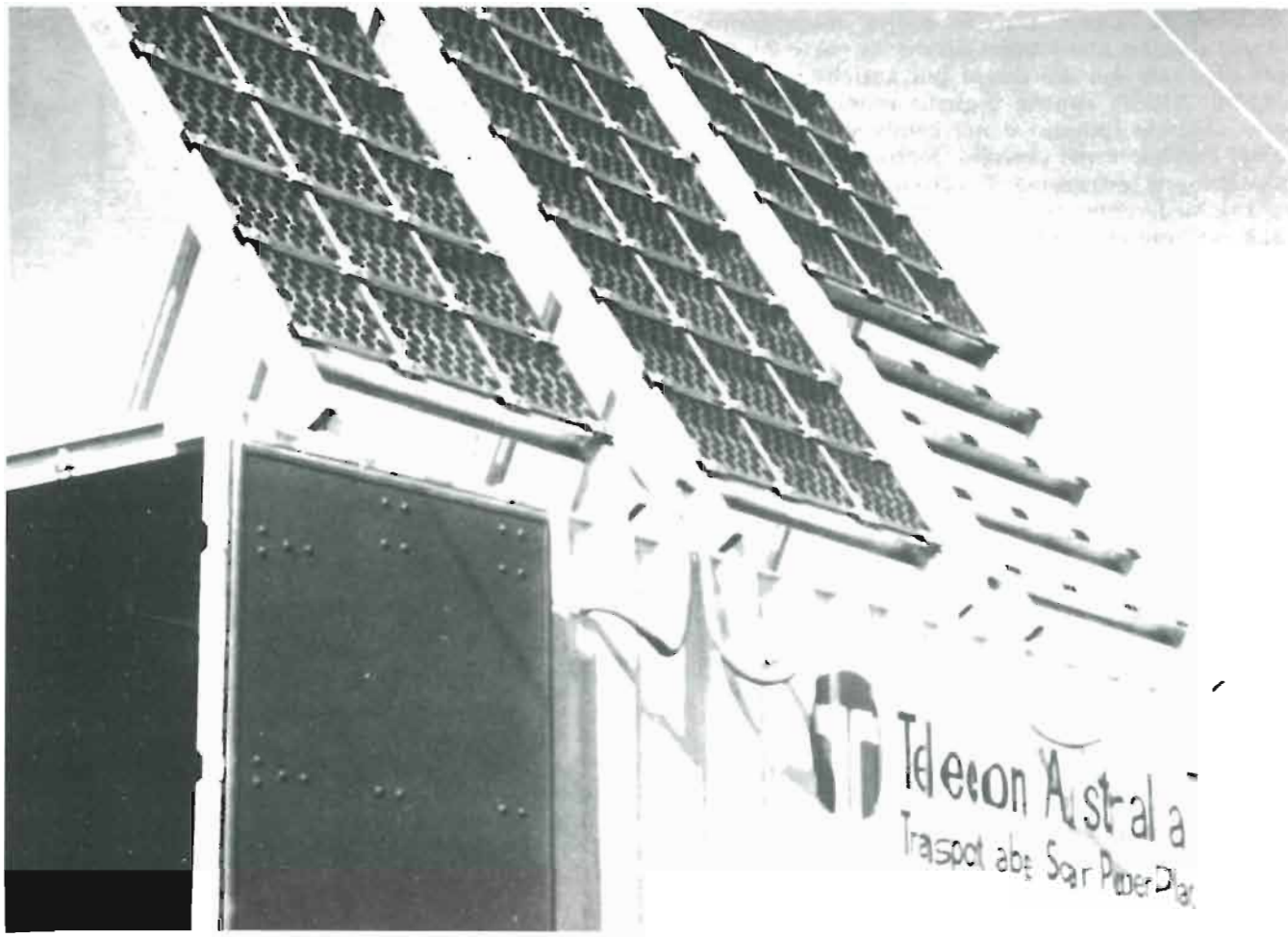


Fig. 5 - Sistema di collegamento radio a microonde realizzato per la Stone-Plate Electrical Pty limited di Melbourne (Australia). Il collegamento copre un tronco di 580 km, con 13 ripetitori. Ogni ripetitore richiede 125 W a 24 V. La potenza complessiva fornita dalle varie unità solari s'aggira sui 10 kW

Il potenziale V_B è un *potenziale di contatto*. La sua misura, attuata mediante un voltmetro ad elevata impendenza, collegato ai contatti, dello stesso metallo, disposti alle due estremità delle zone rispettivamente n e p, non darà alcun risultato in quanto il potenziale di contatto, in queste condizioni, viene annullato (figura 4a). Valori tipici del potenziale di contatto sono $V_B = -0{,}7$ V, $V_{C1} = +0{,}5$ C e $V_{C2} = +0{,}2$ V.

Se ora investiamo questo diodo (che d'ora in avanti chiameremo cella) con energia solare, ciò produrrà nella regione della giunzione coppie di elettroni-lacune, che verranno separate tra loro dal campo elettrico associato al potenziale di contatto V_B: le lacune saranno forzate ad andare verso la zona *p*, e gli elettroni verso la zona *n*. Di conseguenza, il potenziale V_B diminuirà di valore, scendendo a 0,1 V. E' però anche vero che il contatto *p* si troverà allora con un potenziale di +0,6 V al di sopra di quello del contatto *n*.

Questo valore di tensione (a differenza del caso *a*) può essere misurato (dato che il potenziale di diffusione nella giunzione polarizzata in senso inverso, formato nel circuito esterno, non viene influenzato); inoltre se l'irradiazione sarà sufficientemente intensa darà luogo ad *una corrente* diretta dalla regione *p* alla regione *n*.

Quando un diodo viene usato come raddrizzatore (fig. 4b), la sorgente di tensione esterna con il suo terminale positivo collegato al contatto *p* farà circolare all'interno del diodo una corrente diretta dalla zona *p* alla zona *n*. Tale comportamento è indicato dalla curva caratteristica di un diodo raddrizzatore, che passa appunto attraverso l'origine delle coordinate e si dirige verso il primo quadrante, fig. 4d (diodo in conduzione).

In fig. 4c è indicata invece una cella solare irradiata. In questo caso, la circolazione di corrente ha luogo, all'interno della cella, dalla zona *n* alla zona *p*. Questa corrente è chiamata *corrente fotovoltaica*. La produzione di una siffatta corrente (o tensione) ha luogo nel quarto quadrante di fig. 4d; il massimo valore ottenibile è pressochè proporzionale al livello di irradiazione.

In condizioni di valori di irradiazione solare standard, e cioè 1 kW/m², il *rendimento di conversione* di

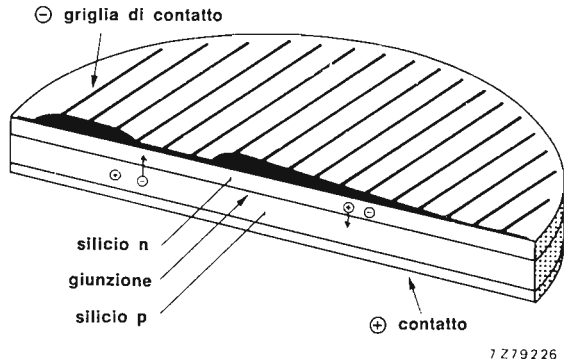


Fig. 6 - Cella solare di un pannello BPX 47A in sezione

una cella solare è circa il 12%. Esso è limitato essenzialmente da tre fattori:

1° di tutto l'intervallo dello spettro compreso tra 0,2 e 4 μm, viene utilizzata solo la parte compresa tra 0,4 e 1,1 μm

2° i fotoni assorbiti posseggono uno straordinario eccesso di energia

3° alcune coppie di elettroni-lacune vengono formate al di fuori della regione della giunzione, e la loro ricombinazione ha luogo prima della loro separazione, che come già detto, dà luogo alla corrente fotovoltaica.

5. - BPX 47A: PANNELLI DI CELLE SOLARI

Raramente viene usata una sola cella solare; in pratica, vengono impiegate più celle collegate in serie e presentate commercialmente sotto forma di pannelli; i cosiddetti *pannelli o batterie solari*. La fig. 7 indica come in pratica è strutturato il pannello Philips/Elcoma *BPX 47A*, formato da 34 singole celle fotovoltaiche al silicio collegate in serie e sistemate entro due lastre di vetro.

Struttura di un pannello

Le celle sono annegate in una resina al silicone e inserite, come già detto, tra due lastre di vetro allo scopo di proteggerle dall'umidità (fig. 7). Per migliorare del 30% la resistenza alle abrasioni e aumentare di 5 volte la sua durezza, il vetro è indurito chimicamente. Le superfici delle piastre di vetro vengono molto levigate in maniera da evitare fenomeni di accumulo di polvere e di neve.

I pannelli hanno una costruzione robusta in modo da poter resistere a venti con velocità fino a 280 km/h e sono resi immuni dai deleteri effetti della radiazione ultravioletta. Siccome il rendimento di conversione dell'energia dei pannelli è dell'ordine del 14% a 0 °C, succederà che più dell'80% della radiazione incidente verrà trasformata in calore, che verrà "portato via" sia dalla resina al silicone nella quale sono annegate le celle sia dalle lastre di vetro, e da queste disperso per convezione nell'aria circostante. Se la radiazione solare che investe il pannello è dell'ordine di 1 kW/m², la temperatura del pannello potrà aumentare di soli 15 °C.

Costruzione di una cella

Ogni cella è costituita da una piastrina "affettata" da un lingotto di silicio del diametro di 57 mm (fig. 6). Il lingotto viene drogato con *boro* (elemento del gruppo III) così da renderlo un materiale semiconduttore di tipo *p*.

Successivamente, si diffonde su una superficie di questa piastrina il *fosforo* (elemento del gruppo V), in maniera da formarvi uno strato di tipo *n*, e di conseguenza, una giunzione *pn* situata a pochi decimi di micron al di sotto dello strato. Il contatto con lo strato esterno della piastrina è ottenuto mediante una griglia metallica che copre il 7% della superficie. Lo strato

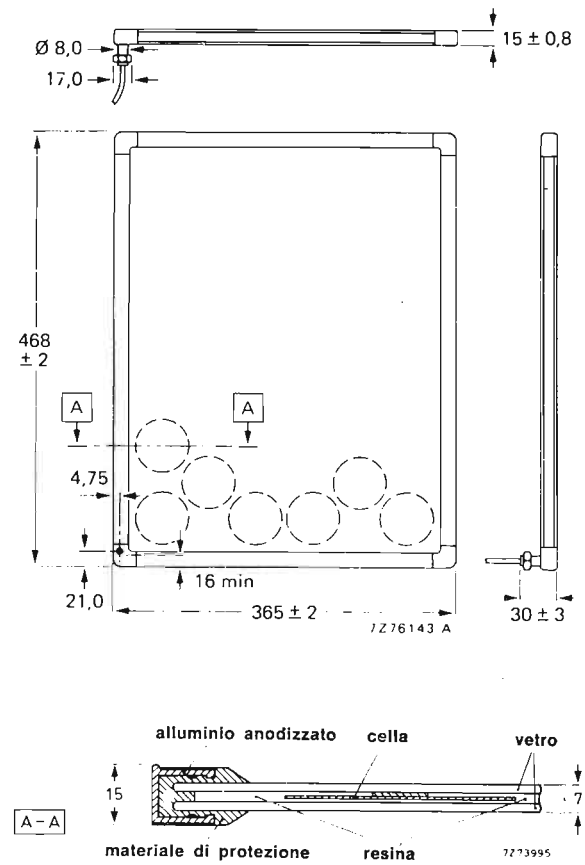


Fig. 7 - Dettagli meccanici di un pannello solare BPX 47A

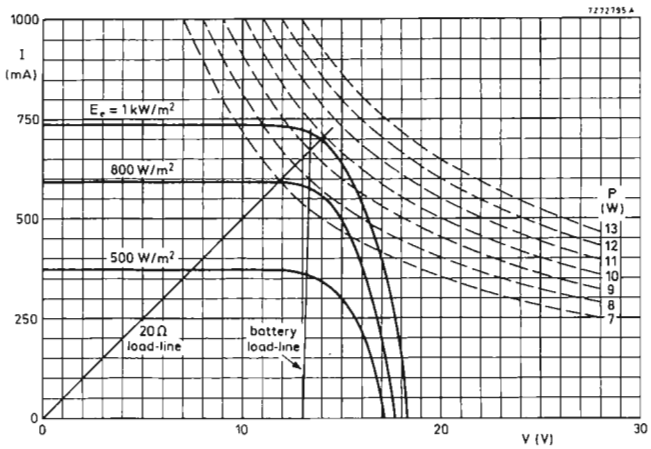


Fig. 8 - Quadrante nel quale, per effetto fotovoltaico, avviene la produzione di energia elettrica in un pannello solare BPX 47A (Tj = 60 °C)

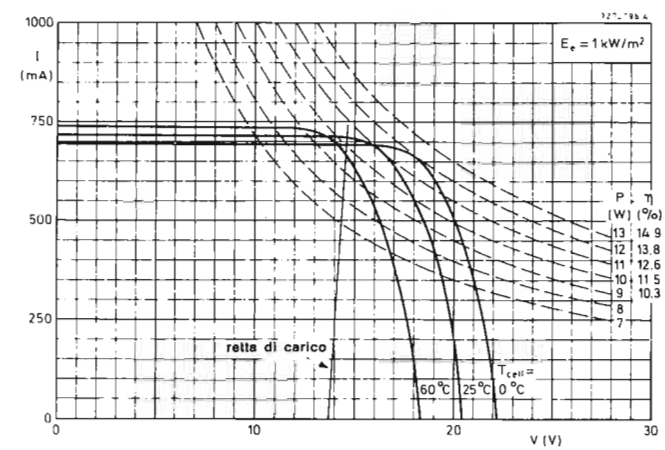


Fig. 10 - Effetto della temperatura sulle curve caratteristiche (effetto fotovoltaico) di un pannello solare BPX 47A

esterno di tipo *n* viene ricoperto con un rivestimento antiriflettente di TiO_2. La superficie esterna dello strato p della piastrina viene completamente metallizzata in modo da riflettere i fotoni non assorbiti, e costituire nello stesso tempo il secondo contatto esterno della cella.

Caratteristiche

Come già detto, le celle solari lavorano nel IV quadrante delle caratteristiche del diodo, e pertanto considereremo solo questo quadrante. In fig. 8 sono riportate le caratteristiche volt-ampere del pannello BPX 47A in funzione dell'irradiazione solare; la temperatura alla giunzione delle celle è di 60 °C. Sono indicate in tratteggio anche le corrispondenti curve della potenza.

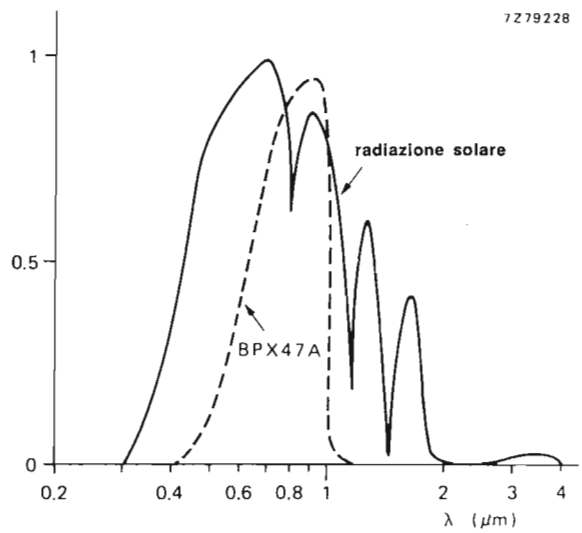


Fig. 9 - Distribuzione spettrale della radiazione solare confrontata con la sensibilità spettrale di un pannello BPX 47A

Insolazione

La risposta di una cella solare dipende dalla distribuzione spettrale della radiazione che la investe. E' per questo motivo che per misurare l'irradiazione che investe una cella solare, non basta solo indicare la potenza per unità di superficie ma occorrerà anche specificare la distribuzione di questa potenza. Il termine *insolazione* è usato più per indicare *"l'irradianza solare"*, e nel nostro caso comprende sia la potenza che investe le celle sia la distribuzione spettrale di questa potenza

Il carico ottimo del pannello

In fig. 8 è riportata la massima potenza ottenibile da un pannello BPX 47A insolato da 1 kW/m²: il valore della potenza fornita è 9,7 W a 60 °C. Questo valore della potenza d'uscita si ha con valori di corrente e di tensione dati da un carico di 20 Ω. Nella figura è indicata la *retta di carico* corrispondente: si constata che la massima corrente disponibile è pressocchè proporzionale al valore di insolazione.

Far funzionare il pannello con un valore fisso di resistenza di carico non è la condizione ideale in quanto a differenti livelli di insolazione varierà anche la condizione di massima potenza data dalle coordinate tensione/corrente della curva caratteristica, per cui anche il valore ottimo della resistenza di carico tenderà a variare.

Quando però, viene usata, come carico, una seconda batteria (più propriamente un accumulatore), questo problema non esiste. Infatti, mentre la potenza d'uscita del pannello con un carico di 20 Ω, tende a scendere fino a 2,9 W quando il valore di insolazione scende a 500 W/m², la stessa potenza d'uscita diminuirà solo fino a 4,8 W se il carico sarà costituito da un accumulatore da 12 V.

L'impiego di una batteria (detta batteria-tampone) come carico è di norma in tutte le applicazioni di pannelli solari. Tale combinazione consente infatti di fornire picchi di corrente che il pannello (o i pannelli) non potrebbero fornire, e di fornirli inoltre durante la

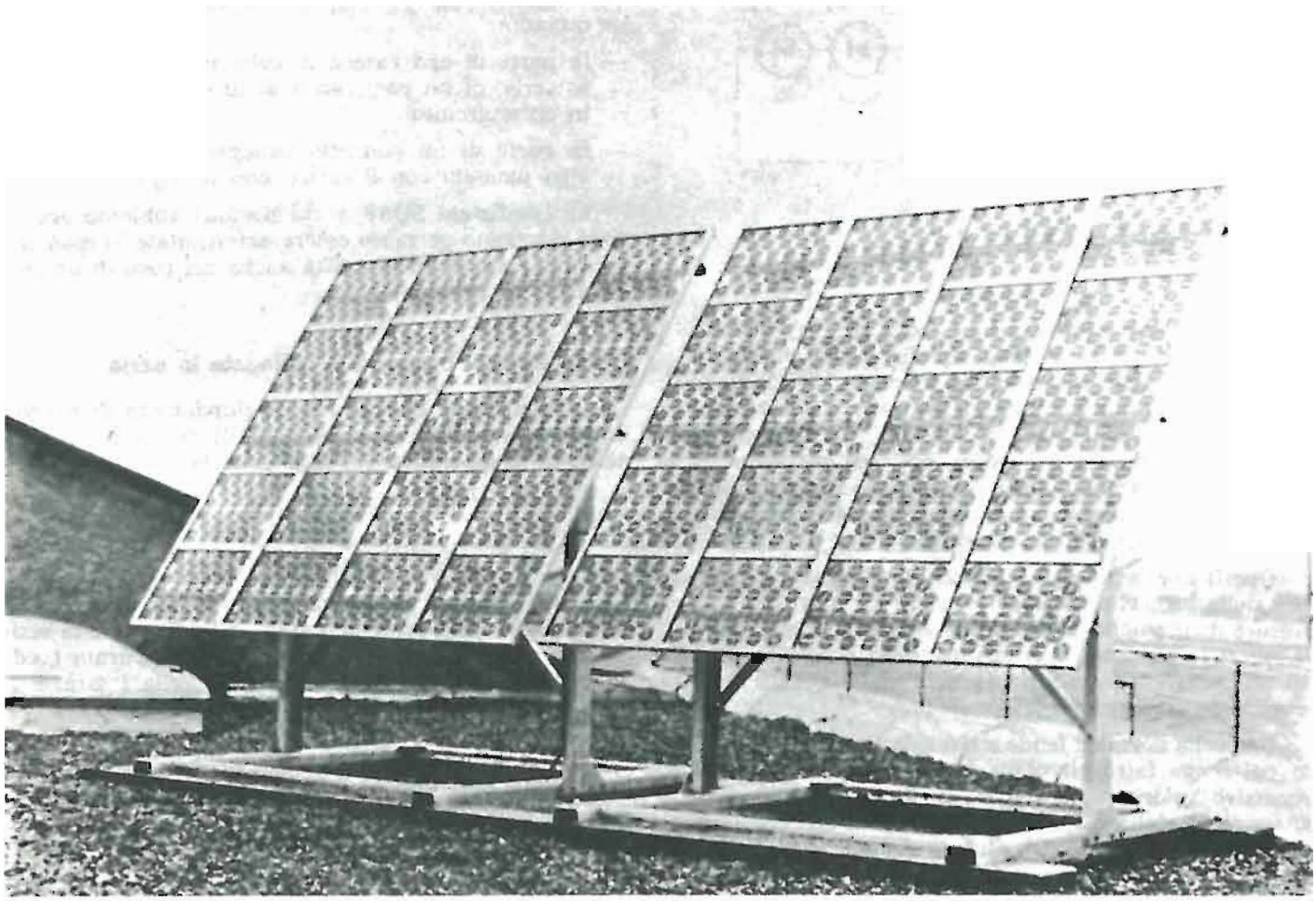


Fig. 11 - Impianto di pannelli solari per l'alimentazione di un ripetitore TV di potenza

notte o in condizioni di cielo coperto; nello stesso tempo la batteria-tampone consentirà al pannello di lavorare, quando viene irradiato, nelle migliori condizioni di funzionamento e di rendimento.

E' per questo motivo che il numero delle celle montate su ogni pannello è stato scelto in maniera da consentire il migliore adattamento con la tensione nominale di 12 V di un accumulatore (sei celle al piombo), collegato in serie ad un diodo di protezione ed ad un regolatore di carica.

Rendimento

Il rendimento di conversione di un pannello solare BPX 47A s'aggira sul 12% in condizioni di insolazione di 1 kW/m². Tale rendimento è limitato in parte da un certo disadattamento tra distribuzione spettrale della luce solare e sensibilità spettrale delle celle dei pannelli (fig. 9), e in parte dal fatto che non tutta l'energia dei fotoni assorbiti viene sfruttata.

Temperatura

La fig. 10 indica l'influenza della temperatura sul funzionamento del pannello solare BPX 47A. Con una insolazione di 1 kW/m², il coefficiente di temperatura della corrente di cortocircuito è circa +0,64 mA/K (mA/°C); quello della tensione a circuito aperto è circa —74 mV/K (mV/°C). Quando la temperatura alla giunzione delle celle va da 0 a 60 °C, la potenza massima d'uscita da 12 W scende a 9,7 W.

La retta di carico indicata in fig. 10 si riferisce ad una batteria completamente carica. Il pannello solare è stato progettato in modo da ridurre al minimo l'influenza della temperatura sulle sue condizioni di funzionamento. Inoltre, siccome il coefficiente di temperatura della tensione di un accumulatore al piombo è negativo, anche questo fatto tenderà a ridurre, in una certa misura, l'effetto della temperatura sull'adattamento in potenza.

6. - CONDIZIONE DI FUNZIONAMENTO SICURO DEI PANNELLI

Come per i normali dispositivi a semiconduttori così anche per le celle solari è possibile definire *un'area* di funzionamento sicuro delimitata sia dalle caratteristiche sia dal modo di funzionamento della cella stessa. Se la cella dovesse lavorare al di fuori di quest'area (detta *S*afe *O*perating *A*rea abbreviata in *SOAR*), essa andrebbe sicuramente incontro alla sua distruzione.

Per definire quest'area (o SOAR) occorre conoscere i valori massimi assoluti di ogni singola cella e del pannello, e le condizioni peggiori in cui cella e pannello potranno funzionare. Come al solito, il parametro più importante per questa valutazione è la *temperatura*.

Fortunatamente, la temperatura alla giunzione di qualsiasi cella può raggiungere valori molto elevati prima che la sua struttura vada incontro a seri guai. La temperatura alla giunzione non è comunque l'unico fattore limitatore nel caso di un pannello a celle solari.

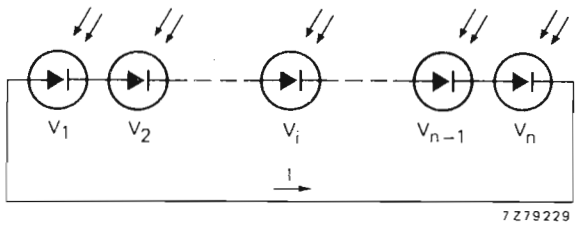


Fig. 12 - Celle solari collegate in serie

Infatti, se la temperatura di una cella supera gli 85 °C, oppure supera di gran lunga quella delle celle adiacenti, il materiale in resina al silicone nel quale le celle sono annegate può andare incontro ad alterazioni meccaniche o addirittura decomporsi. Le alterazioni meccaniche prodotte dal calore possono produrre fenomeni di scollamento della resina dalla superficie sensibile delle celle mentre la decomposizione della resina può produrre una certa coloritura.

Questi due fenomeni tendono ad *attenuare* l'intensità della luce che colpisce la cella; in particolare le rotture meccaniche prodotte dal calore aumenteranno la riflessione mentre la coloritura della resina tenderà ad aumentare l'assorbimento. Entrambi questi fenomeni sono irreversibili.

Una cella normale tende a riscaldarsi anche nel caso in cui venga fatto circolare forzatamente in essa un eccessivo valore di corrente: in questo caso si avrà ai terminali della cella, la formazione di una tensione inversa (vedi più avanti). Questo fenomeno potrebbe verificarsi quando in un pannello irradiato succedesse, che, per un motivo qualsiasi, *una sola cella* venisse a trovarsi parzialmente in ombra. Una cella parzialmente ombreggiata è infatti soggetta alla massima dissipazione quando:

— fa parte di una catena di celle irradiate, collegate in serie, di un pannello o di una serie di pannelli in cortocircuito

— fa parte di un pannello collegato in parallelo ad altri pannelli con il carico non collegato.

Le condizioni SOAR a cui pocanzi abbiamo accennato dovranno pertanto essere determinate in maniera che una cella venga protetta anche nel caso di un suo parziale oscuramento.

Cortocircuito di più celle collegate in serie

In figura 2 è illustrato il funzionamento di *n* celle collegate in serie, in condizioni di cortocircuito. La tensione complessiva V_{tot} sarà data da:

$$V_{tot} = \sum_{i=1}^{0} V_i = 0$$

Nelle celle circolerà una corrente I, proporzionale all'intensità di irradiazione delle celle. Siccome la resistenza interna delle celle può essere trascurata (vedi le figg. 8 e 10), la dissipazione nella cella *i* sarà:

$$P_i = V_i I.$$

Supponendo che le celle siano identiche e ugualmente irradiate sarà:

$$V_i = \frac{V_{tot}}{n} = 0,$$

e di conseguenza la dissipazione nella cella *i* sarà zero.

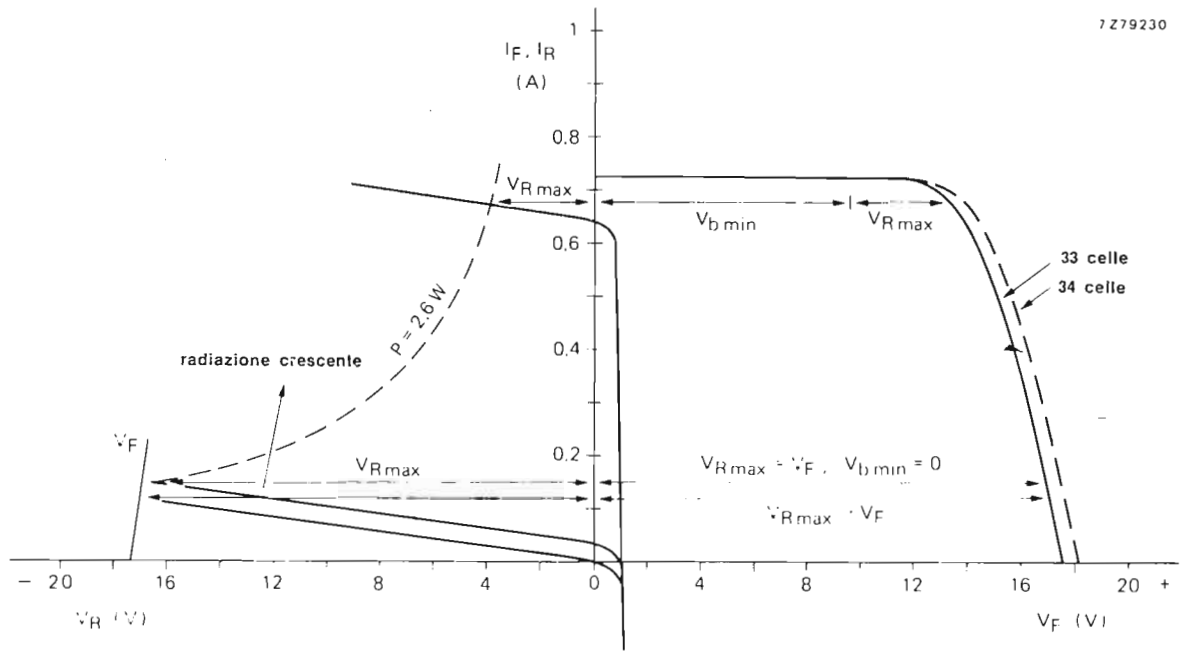
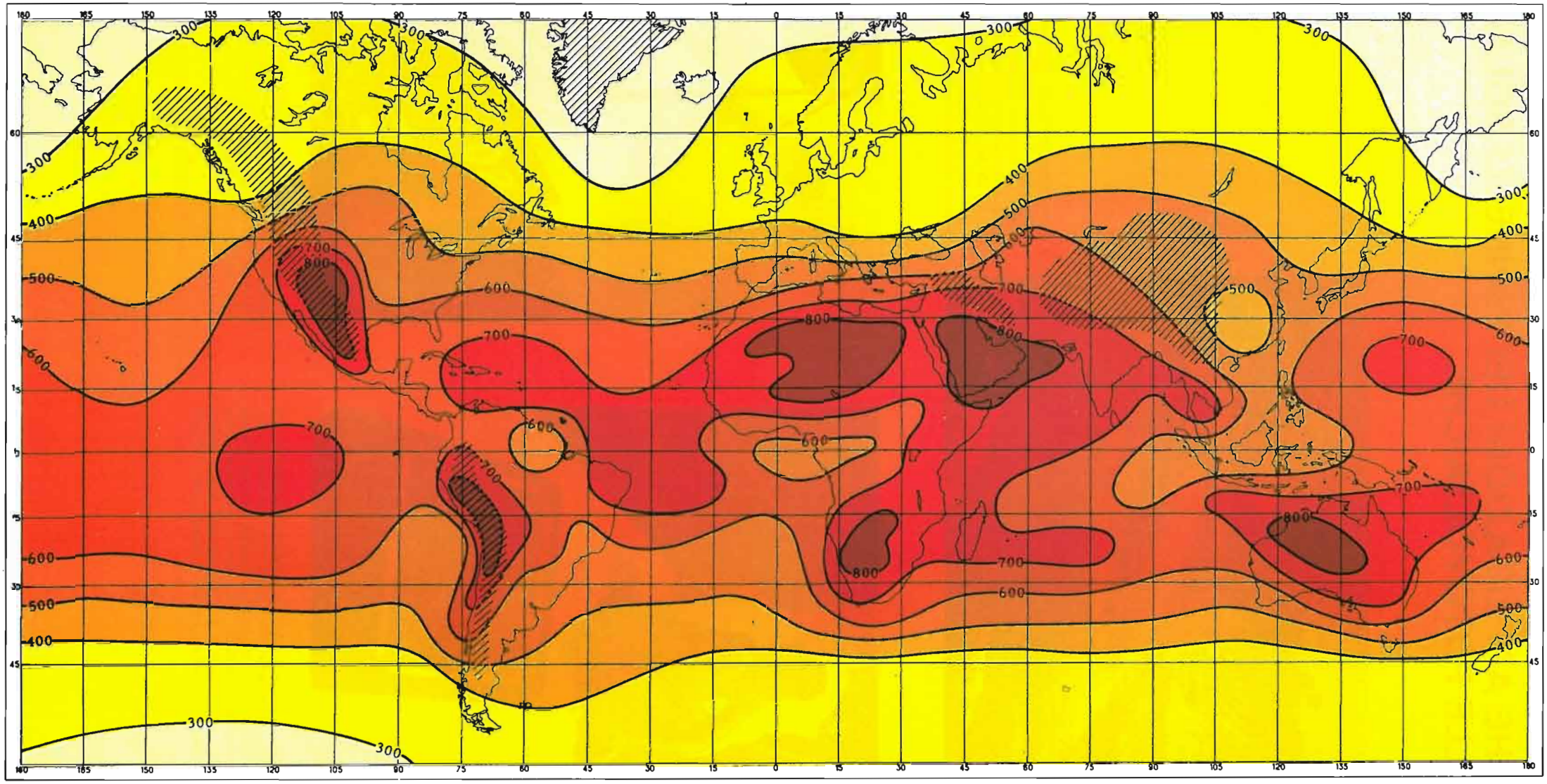


Fig. 13 - Caratteristiche fotovoltaiche di 33 e 44 celle in un pannello BPX 47A, e caratteristiche inverse di una singola cella dello stesso pannello

DISTRIBUZIONE MEDIA ANNUALE DELL'ENERGIA SOLARE IN kJ/cm² SULLA SUPERFICIE TERRESTRE

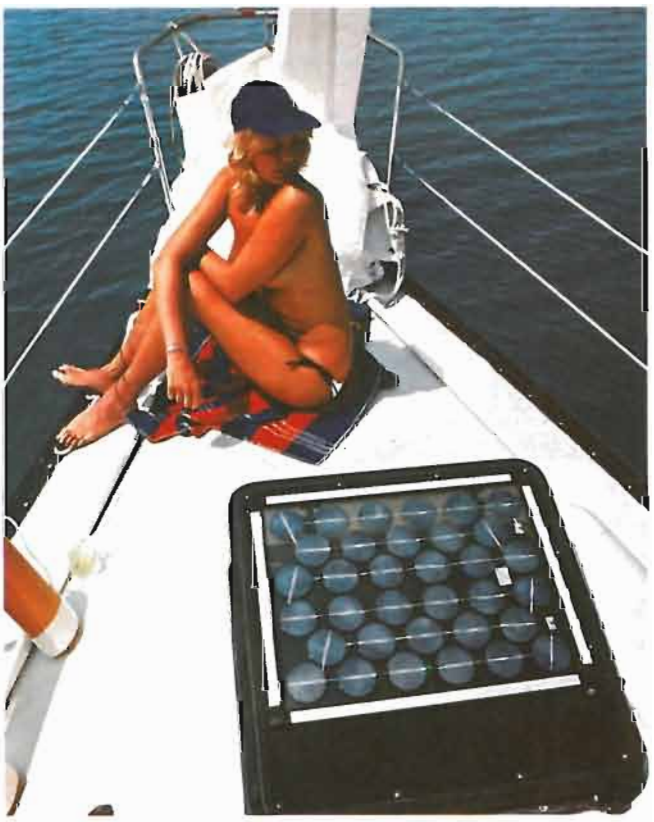


PHILIPS

PHILIPS Electronic components and materials

TIPICHE APPLICAZIONI DEI PANNELLI SOLARI A CELLE FOTOVOLTAICHE

Il pompaggio dell'acqua è uno dei campi nei quali i pannelli solari danno ottimi risultati ed eccellente rendimento. Un impianto ben progettato può essere in grado infatti di pompare in superficie da una profondità di 25 m, da 15 a 100 m^3 d'acqua al giorno impiegando un sistema di pannelli solari in grado di fornire 400 W con 1.3 kW di cresta. (Impianto realizzato in Corsica).



Esempio d'impiego di pannelli solari Philips/Elcoma in imbarcazioni a vela da diporto. Anche nelle imbarcazioni da competizione i pannelli solari hanno trovato un interessante impiego. Ne è un esempio la gara transatlantica in solitario, effettuata da due imbarcazioni francesi, quelle di Eric Tabarly e Alain Colas, nelle quali l'energia per le apparecchiature a bordo era fornita da pannelli solari Philips/Elcoma.

Esempio di piccolo impianto a pannelli solari impiegato per l'alimentazione delle apparecchiature di una colonnina di soccorso lungo l'autostrada Roma-L'Aquila. (Impianto realizzato dalla Divisione Telecomunicazioni della Philips S.p.A.)

A cura dell'Ufficio Documentazioni Tecniche della Philips/Elcoma.

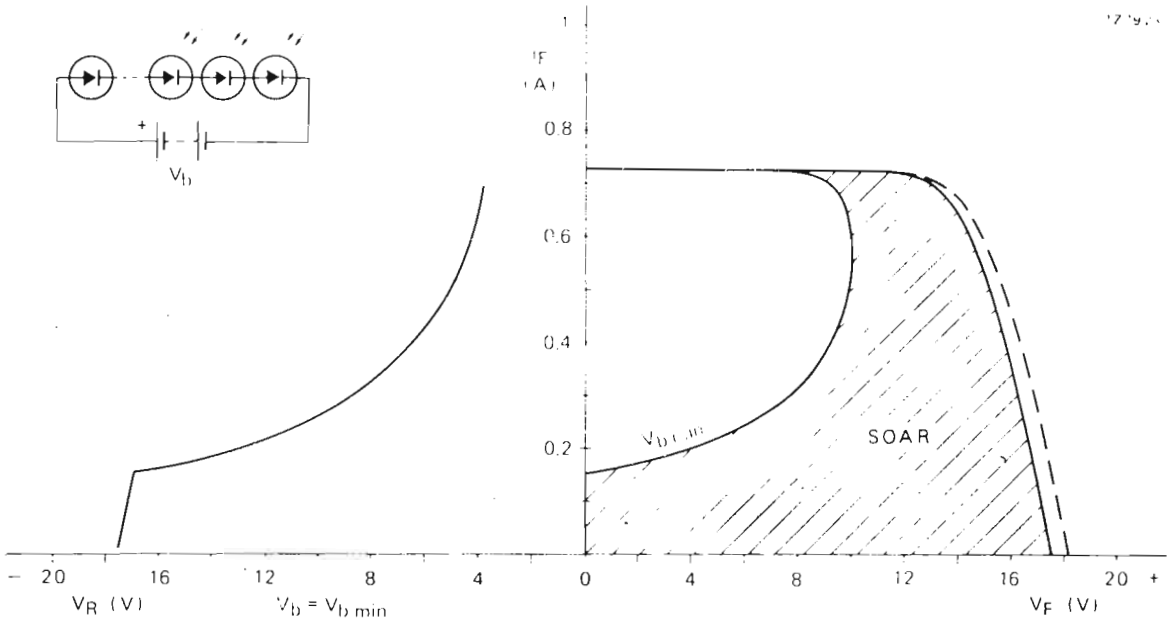


Fig. 14 - Curve SOAR (Safe Operating ARea) di un pannello solare BPX 47A irradiato con 1 kW/m²

Queste condizioni di funzionamento ideali raramente si verificano in pratica. Se una data cella produce una corrente di cortocircuito $I_{cc} > I$, allora sarà $V_i > 0$. Se la corrente di cortocircuito $I_{cc} < I$, allora sarà $V_i < 0$; ciò si verificherà nel caso in cui una cella risulti parzialmente ombreggiata. Per cui, se $V_i < 0$ (inversione della tensione), $P_i > 0$, e la cella si riscalderà.

La condizione $V_i > 0$ non può condurre ad un surriscaldamento. Nel peggiore dei casi, se tutte le celle meno una fossero in ombra, la cella irradiata non sarebbe assolutamente in grado di far circolare nelle celle in ombra un valore significativo di corrente.

E' essenziale, comunque, che il sistema risulti protetto nei confronti della condizione $V_i < 0$, condizione che diventa particolarmente severa quando una cella risulta anche parzialmente in ombra. Questa particolare condizione è illustrata molto in dettaglio nella fig. 13 nella quale le curve a *destra* sono le caratteristiche volt-ampere di 33 e 34 celle rispettivamente di un pannello BPX 47A mentre le curve *a sinistra* sono le caratteristiche inverse di una cella singola dello stesso pannello rilevate in differenti condizioni di ombreggiatura. La caratteristica inversa, passante per le origini delle coordinate, si riferisce alla cella completamente in ombra. Si tenga presente che, in base ad una convenzione stabilita per le celle solari, le correnti si intendono positive.

La somma delle tensioni delle 33 celle irradiate farà circolare forzatamente attraverso la cella in ombra una certa corrente, producendo ai capi di quest'ultima un certo valore di tensione inversa. L'intensità della corrente circolante nella cella in ombra e la potenza dissipata in quest'ultima dipenderà dal grado di ombreggiatura.

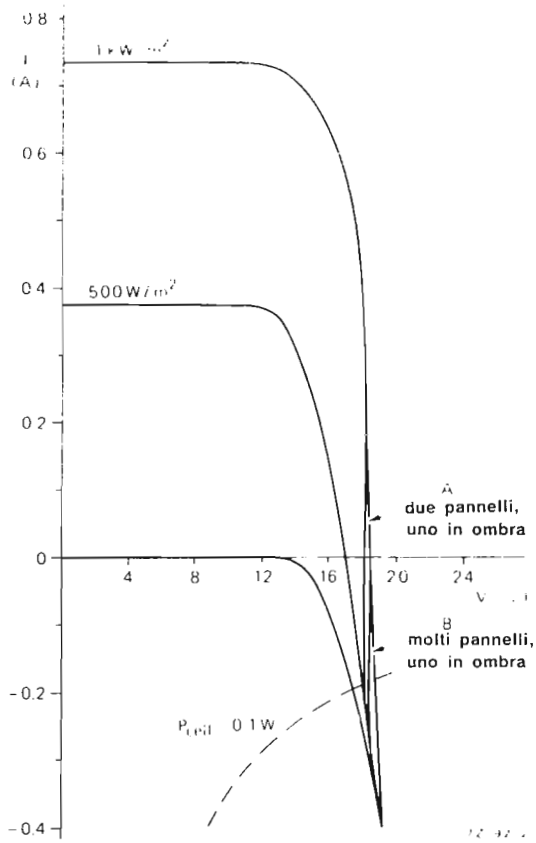
In una cella completamente in ombra, la massima corrente ammissibile è 120 mA e la tensione inversa è V_R = 17 V mentre la dissipazione è 2,04 W.

A questo punto, aumentando l'irradiazione sulla cella in ombra, registreremo anche un aumento di corrente circolante in quest'ultima, e di conseguenza anche un aumento di dissipazione. Le altre 33 celle, se ricevono un'insolazione di 1 kW/m², avranno una tensione diretta V_{F33} = 13,5 V e una corrente I = 670 mA.

Di conseguenza, se la cella in ombra viene irradiata in maniera da dare una corrente di 570 mA, le altre celle faranno circolare in essa una corrente aggiuntiva di 100 mA, con il risultato di avere una dissipazione di 9 W. Questo valore di dissipazione è superiore a quello tollerato da una cella il quale, com'è noto, corrisponde alla potenza ricevuta con un'insolazione di 1 kW/m².

In un pannello BPX 47A, ciascuna cella ha una superficie di 26 cm² e, ad una insolazione di 1 kW/m², riceverà una potenza **massima** di 2,6 W, valore quest'ultimo di estrema garanzia. Questa curva della potenza è riportata in fig. 13 (si tenga presente che se le celle in ombra fossero più di una, la tensione prodotta dalle celle irradiate verrebbe ripartita tra loro, e di conseguenza anche la potenza verrebbe ridotta ed anche la dissipazione risulterebbe inferiore). Occorrerà pertanto escogitare qualche accorgimento per limitare la dissipazione in una cella in ombra. Il sistema più ovvio sarebbe quello di mettere in parallelo ad ogni cella un diodo di protezione. Questa però sarebbe una soluzione troppo costosa. La soluzione migliore è quella di assicurarsi che il pannello risulti sempre in parallelo ad una sorgente di tensione, riducendo in questa maniera la tensione responsabile della corrente che circola nelle celle in ombra.

Quando i pannelli solari vengono usati per caricare le batterie - tampone, già quest'ultime rappresentano automaticamente una buona protezione, in quanto esse costituiscono una vera e propria sorgente di tensione. La protezione completa richiede un minimo di tensione di batteria V_b che dipenderà dall'insolazione e dal grado di ombreggiatura della cella. Quando è disponibile il



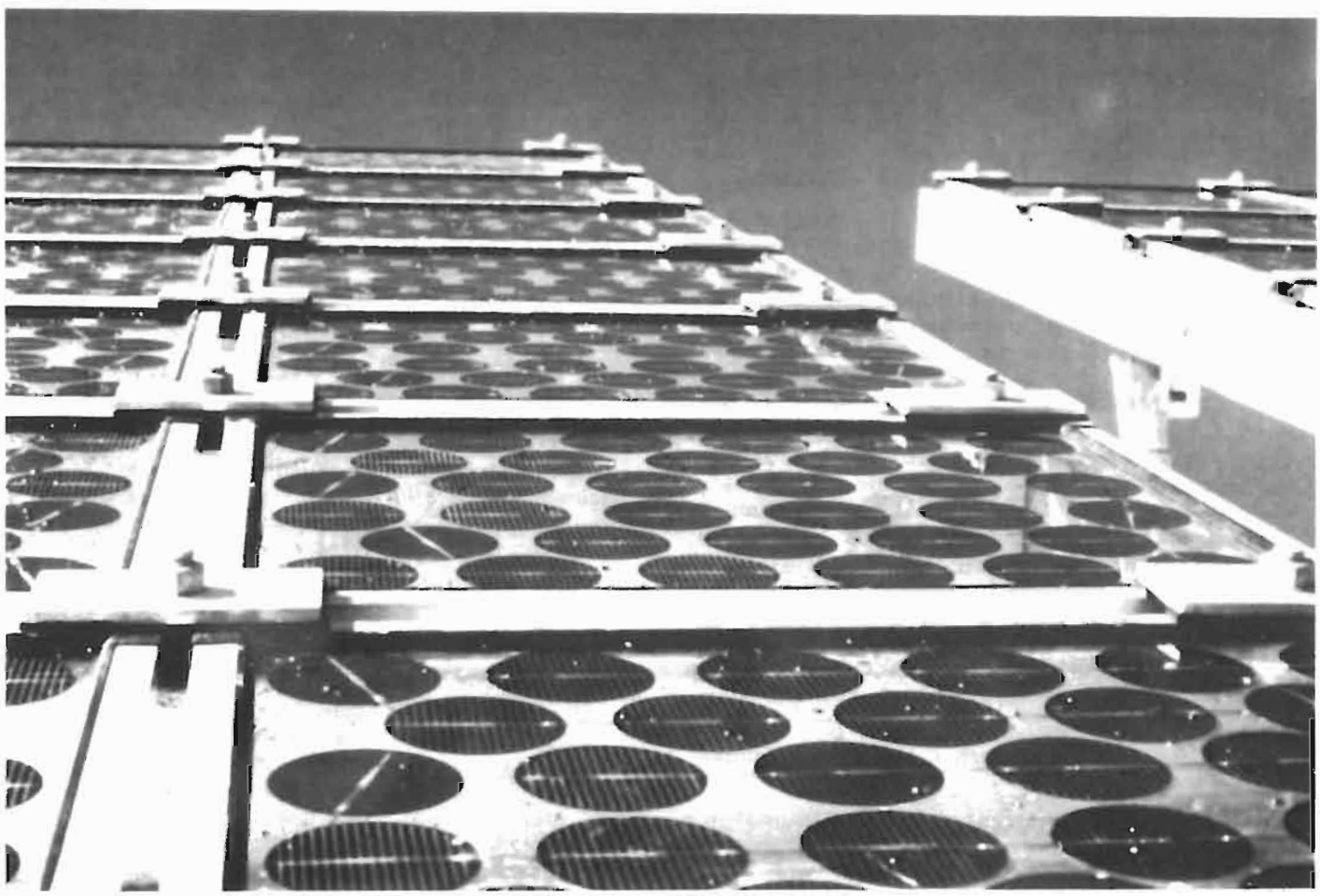
massimo valore d'insolazione e cioè, 1 kW/m², le condizioni peggiori per ciò che riguarda la potenza e la tensione disponibili si avranno in corrispondenza di questo valore. Da ciò si conclude che occorrerà tener conto solo del grado di ombreggiatura della cella.

Nell'esempio dato prima nel quale I = 670 mA, V_B dovrà essere ridotto a 2,6/0,67, e cioè 3,9 V, e ciò per evitare una dissipazione eccessiva. Ciò significa che V_b dovrà avere il valore minimo di 13,5 - 3,9 = 9,6 V (vedi fig. 13). Ovviamente, quando I < 154 mA, P < 16,9 × 0,154 = 2,6 W e non sarà richiesta alcuna sorgente di tensione. Determinando i punti intermedi di V_b sulla fig. 13, è possibile tracciare la curva di V_b minimo, come indicato in figura 14. L'area di funzionamento sicuro verrà pertanto a trovarsi tra le caratteristiche del pannello e la suddetta curva di V_b minimo.

Dalla curva di fig. 14 risulta evidente che se V_b > 10 V, nessun pericolo di danneggiamento potrà derivare da fenomeni di ombra. Nel caso in cui venissero collegati in serie un certo numero di pannelli, occorrerà mettere in parallelo a ciascun pannello un diodo di protezione.

Fig. 15 - Caratteristica fotovoltaica e caratteristica diretta di un diodo; indicano l'effetto di una disuguale insolazione nel caso di funzionamento in parallelo

Fig. 16 - Altro impianto di pannelli solari Philips impiegato per il pompaggio dell'acqua



Collegamento in parallelo dei pannelli: condizione di circuito aperto

Se due pannelli, collegati in parallelo e sprovvisti di carico ricevono differenti valori d'insolazione, succederà che il pannello a più basso livello d'insolazione verrà fatto lavorare nella regione *diretta* della sua caratteristica (diodo). La fig. 15 indica il quadrante in cui le celle *generano* corrente e il quadrante della conduzione diretta. Nel caso in cui un pannello ricevesse 500 W/m² e l'altro 1 kW/m², il funzionamento coinciderebbe con il punto di intersezione della linea A con la relativa caratteristica. Le tensioni ai capi dei pannelli sarebbero ovviamente uguali ed anche le correnti che li attraverserebbero sarebbero uguali ma di segno contrario.

Nel caso uno tra molti pannelli collegati in parallelo ricevesse 500 W/m² e gli altri 1 kW/m², la corrente sarebbe più intensa. Nel caso peggiore, tutta l'energia prodotta dai pannelli che ricevono 1 kW/m² verrebbe dissipata nel pannello che riceve solo 500 W/m². Questo valore di dissipazione verrebbe ripartito equamente tra tutte le 34 celle. Di conseguenza, l'aumento della temperatura sarà limitato e consentirà di collegare in parallelo 12 pannelli solari.

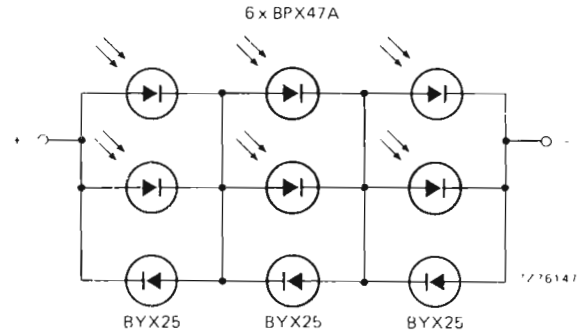


Fig. 17 - Matrice di sei pannelli BPX 47A protetti da tre diodi raddrizzatori BYX 25

Pannelli in serie/parallelo

Un insieme di *n* pannelli in serie collegati con *m* pannelli in parallelo richiederà soltanto *n* diodi di protezione. L'insieme dovrà comunque essere collegato *a matrice*, come indicato nell'esempio di fig. 17 nella quale n = 3 e m = 2.

Questa disposizione non può produrre alcun danno ai pannelli in caso di eccessiva dissipazione; ciò non toglie però che per proteggere le singole celle non sia richiesta anche in questo caso una sorgente di tensione.

Appendice 1: NUOVI PANNELLI SOLARI PHILIPS/ ELCOMA DESTINATI A SOSTITUIRE IL TIPO BPX 47A

Le considerazioni generali sullo sfruttamento dell'energia solare mediante pannelli solari (ad esempio BPX 47A), valgono anche per i nuovi pannelli che la Philips/Elcoma sta introducendo sul mercato e dei quali qui di seguito forniamo i dati caratteristici essenziali.

Le celle dei nuovi pannelli hanno un diametro di 100 mm; irradiate con 1 kW/m², e a 25 °C, forniscono una corrente di 2 A ad una tensione di 580 mV. Con queste nuove celle solari sono stati realizzati due tipi di pannelli: uno formato da 18 celle (BPX 47B - 18) e l'altro da 20 celle (BPX 47B - 20).

I dati tecnici che qui sotto forniamo dei nuovi pannelli si riferiscono ad una irradiazione solare di 1 kW/m² e ad una temperatura di 25 °C della cella:

Tipo	Dimensioni (mm)	Peso (kg)	Tensione a circuito aperto (V)	Corrente di corto-circuito (A)	Corrente alla massima potenza (A)	Tensione alla massima potenza (V)	Potenza mssima (W)
BPX 47B -18	584 × 468 × 15	4	10,5	2,1	2,01	8,2	16,5
BPX 47B - 20	584 × 468 × 15	4	11,6	2,1	2,01	9,1	18,3
BPX 47C	1055 × 428 × 47	11	21,2	2,1	16,4	2,01	33,0

Due esempi di progettazione di impianti a pannelli solari

Vengono illustrate le condizioni di irradiazione ottimali che permettono di ottenere il massimo rendimento da un sistema a pannelli solari. Si danno consigli di massima per la scelta delle batterie-tampone. Infine vengono forniti i dati essenziali riguardanti la realizzazione di un regolatore di carica della batteria-tampone e di un sistema di azionamento per motori in c.c.

INTRODUZIONE

Un impianto di trasformazione dell'energia solare in energia elettrica mediante pannelli solari deve essere in grado di fornire energia elettrica in qualsiasi momento. E' evidente però che la *potenza d'ingresso* di questo sistema sarà continuamente variabile in quanto dipenderà non solo dalle dimensioni e dal numero dei pannelli ma anche, e principalmente, dalla quantità di luce solare che investe i pannelli stessi. Quest'ultimo fattore dipenderà, a sua volta, dal *luogo* in cui l'impianto è installato, *dall'ora del giorno*, dalla *stagione* e dalle *condizioni del tempo*.

E' evidente che ci saranno dei periodi in cui la *potenza d'ingresso* sarà zero; motivo per cui, ogni impianto a pannelli solari dovrà essere munito di un *sistema di conservazione dell'energia*.

E' parimente evidente che sarà estremamente difficile progettare un impianto a pennelli solari che sia nello stesso tempo economico e efficiente. Ciò richiederà l'acquisizione di un gran numero di dati e di informazioni e l'effettuazione di qualche compromesso tra i vari parametri in gioco. E' per questo motivo che anche per la progettazione di un impianto a pannelli solari, quando è possibile, sarà opportuno ricorrere al computer il quale potrà indicare, in maniera esatta, in base a tutti i dati acquisiti riguardanti il luogo e le condizioni di insolazione, il valore più adatto da dare ai parametri del sistema, in modo da ottenere il rendimento più elevato possibile ottenibile in quelle date condizioni.

Qui di seguito forniamo alcuni *dati d'ingresso* che potranno servire per la programmazione del computer.

1) Qualità della luce solare

L'intensità giornaliera della luce solare dipende dalla latitudine del luogo dove dovrà essere installato l'impianto e dalla stagione dell'anno. Durante le ore diurne, la luce del sole può investire il pannello solare in due modi:

1) *direttamente:* in questo caso la luce può essere modificata soltanto dall'assorbimento atmosferico e da fenomeni di dispersione

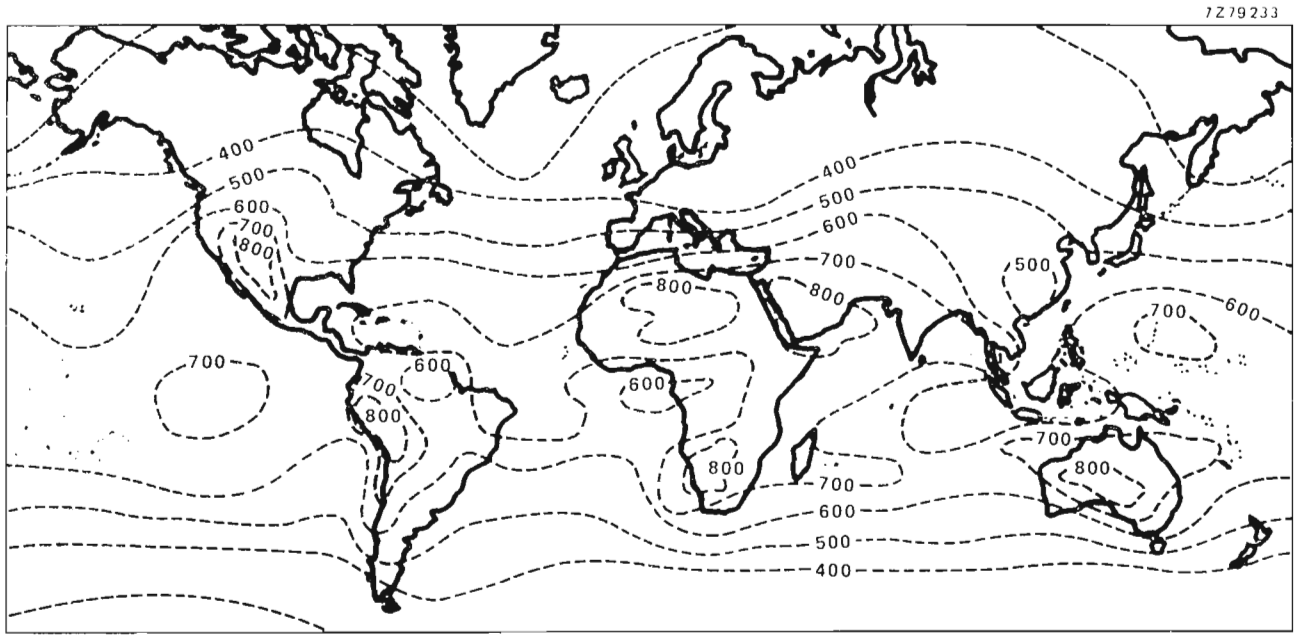


Fig. 1 - Distribuzione media annuale dell'energia solare (in kJ/cm²) sulla superficie terrestre

2) *indirettamente:* la luce ricevuta è quella diffusa dalle nubi, dispersa dall'atmosfera oppure riflessa da superfici adiacenti. Anche le ombre più scure sono illuminate in qualche modo dalla radiazione indiretta.

La radiazione del sole I che investe perpendicolarmente un pannello è data da:

$$I = I_0 \, \mathrm{esp}\,(-ax)$$

nella quale,

I_0 = densità del flusso radiante;

x = distanza percorsa dalla luce del sole attraverso l'atmosfera;

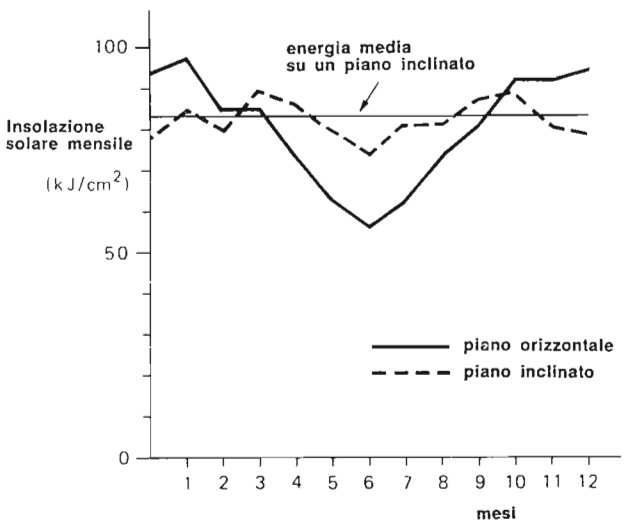


Fig. 2 - Confronto tra l'energia solare captata mensilmente da un sistema a pannelli inclinato di un angolo pari a quello della latitudine del luogo e l'energia captata dallo stesso sistema disposto orizzontalmente (valori misurati su un impianto a pannelli solari installato a Allice Spring, Australia)

a = coefficiente di estinzione (coefficiente di assorbimento sommato al coefficiente di dispersione).

Ovviamente, il valore di *x* dipenderà dall'altezza del sole al di sopra dell'orizzonte e dall'altitudine del luogo rispetto al livello del mare.

Nel caso in cui, la radiazione indiretta fosse preponderante, occorrerebbe studiare la natura delle superfici riflettenti circostanti; la neve, per esempio, riflette molto intensamente la luce.

La fig. 1 dà un'idea generale della distribuzione dell'energia solare che investe la terra; essa rappresenta l'intensità d'insolazione media ricavata lungo l'arco di un anno. I valori indicati valgono per superfici orizzontali. Si tenga presente che 1 kJ/cm² corrisponde ad una media d'insolazione giorno/notte pari a 0,33 W/m².

La fig. 2 indica l'effetto che si ha inclinando un sistema di pannelli di un angolo pari alla latitudine del luogo. Si può facilmente rilevare che come effetto si ha una riduzione della variazione di energia ricevuta nell'arco di un anno.

2) Altri effetti climatici

Per varie ragioni è consigliabile dare ai pannelli solari un'angolazione diversa da quella della latitudine. Così, per impedire accumuli di neve, occorrerà che i pannelli siano inclinati quasi di 90°. Come pure, per impedire l'accumulo di sabbia nei deserti dei tropici, l'inclinazione dei pannelli sarà di 45°. Nelle regioni piovose tropicali, per far sì che i pannelli possano pulirsi da se, occorrerebbe dare ad essi una pendenza minima di 30°.

I suddetti fattori spesso possono influire a tal punto sulla progettazione di un sistema di pannelli solari da rendere di secondaria importanza il rendimento stesso del sistema. Per esempio, un sistema di pannelli installato nei pressi dell'equatore potrebbe essere forma-

to da un uguale numero di pannelli inclinati di 30° in direzione nord-sud.

3) La potenza richiesta

Occorrerà ovviamente stabilire la potenza media richiesta dal sistema ed anche il massimo valore occorrente per un determinato impiego. Di questa potenza occorrerà stabilire quella occorrente a breve, e a lungo termine. Da un'esatta valutazione dei suddetti fattori, si potrà scegliere quale *sistema d'immagazzinamento di energia* sarà più opportuno adottare. In particolare, ciò consentirà di scegliere il tipo di accumulatore più adatto e la relativa capacità.

Nel caso i periodi di mancanza di sole fossero molto prolungati, occorrerebbe impiegare un accumulatore con autoscarica lenta (piombo puro). Viceversa, nei tropici dove i periodi di mancanza di sole sono brevi e ben definiti, potrebbero essere impiegati accumulatori con autoscarica veloce (piombo-antimonio). Autoscarica significa che l'accumulatore si scarica a vuoto, e cioè anche senza carico

4) Condizioni climatiche

E' ovvio che una conoscenza più completa possibile delle condizioni climatiche del luogo sarà di estrema utilità per il progettista di un sistema di trasformazione di energia solare in energia elettrica mediante pannelli solari. I dati metereologici riguardanti località inaccessibili sono solitamente molto approssimativi, e di conseguenza, in questi casi, occorrerà procedere ad una misura diretta "in loco" dell'intensità della radiazione solare e delle sue variazioni: alcune condizioni possono essere simulate mediante computer; i risultati sono però molto approsimativi.

Conclusione: più informazioni si potranno avere sulle condizioni metereologiche di un dato luogo e sulla intensità della radiazione solare, minore sarà il costo, a parità di rendimento, dell'impianto.

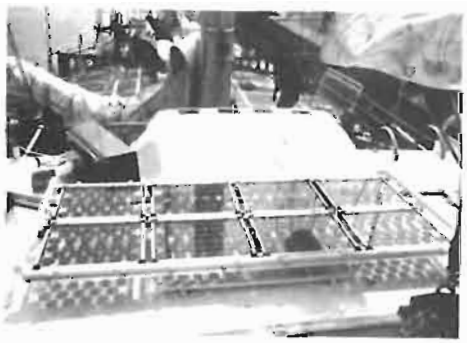
IMPIANTI A PANNELLI SOLARI

La fig. 3 indica gli elementi essenziali di un impianto di trasformazione dell'energia solare in energia elettrica mediante pannelli solari. L'impianto impiega un regolatore in serie.

Gli elementi essenziali sono:

— il sistema dei pannelli

— il diodo di protezione, collegato in senso inverso per impedire che la batteria si scarichi attraverso i pannelli solari



Esempio d'impiego di pannelli solari Philips/Elcoma in imbarcazioni a vela da diporto e da competizione. (In alto a destra). Altro esempio d'impiego dei pannelli Philips/Elcoma. Il modulo è montato su una boa. Le apparecchiature installate e alimentate dal pannello solare BPX 47A sono in grado di fornire, in ogni istante, la posizione della boa, e di conseguenza, la direzione delle correnti del mare, nonchè le caratteristiche fisiche dell'acqua del mare. Questo studio delle correnti marine serve a sua volta per conoscere la rotta percorsa dalle larve delle aragoste e dei gamberi.

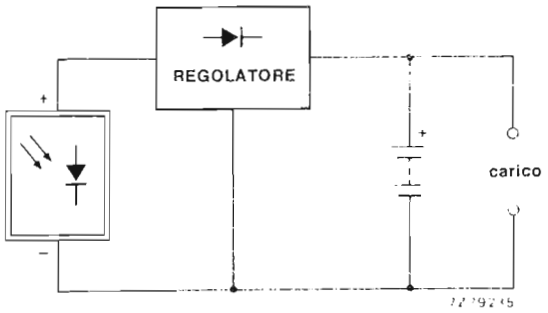


Fig. 3 - Elementi essenziali di un impianto a pannelli solari; in questo caso il regolatore è collegato in serie

— un regolatore di carica della batteria
— un certo numero di batterie per l'immagazzinamento dell'energia.

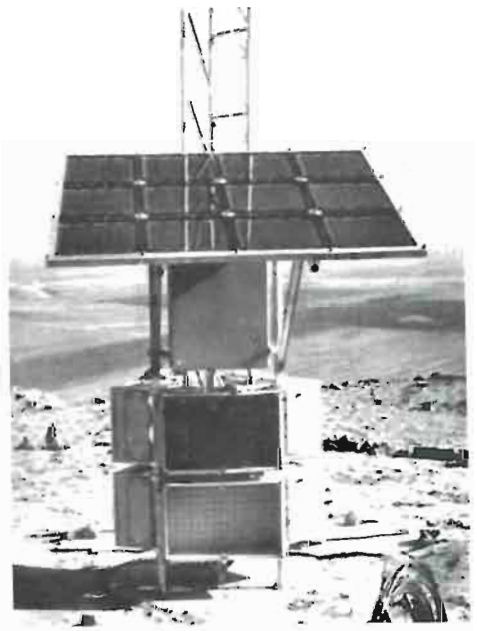
Eventuali altri diodi di protezione che si rendessero necessari, verrebbero incorporati nel sistema dei pannelli. Il diodo di protezione collegato in senso inverso potrà invece essere incorporato nel regolatore. Nel caso il carico fosse costituito solo da un motore, l'accumulatore e il regolatore potrebbero essere sostituiti da un sistema elettronico di controllo del motore.

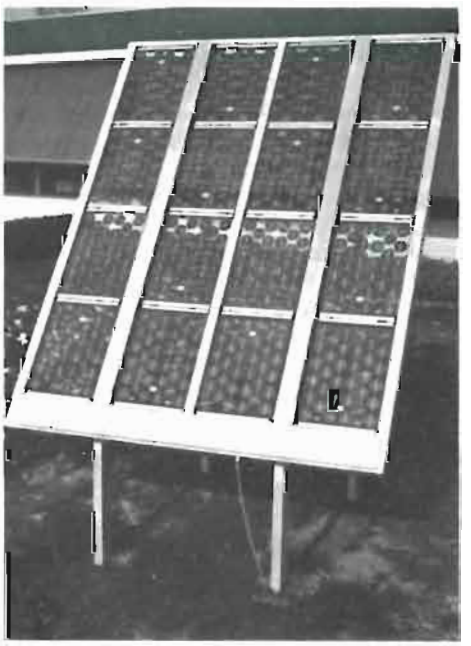
Gli accumulatori

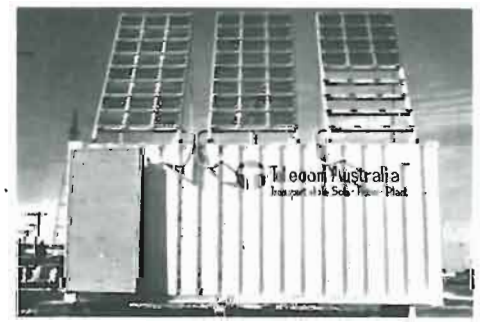
Oltre a fornire corrente durante i periodi di ombra,, gli accumulatori hanno anche altre funzioni. Una l'abbiamo già menzionata quando abbiamo detto (I parte) che l'accumulatore, visto come sorgente di tensione, fa sì che i pannelli non vadano soggetti ad eccessiva dissipazione.

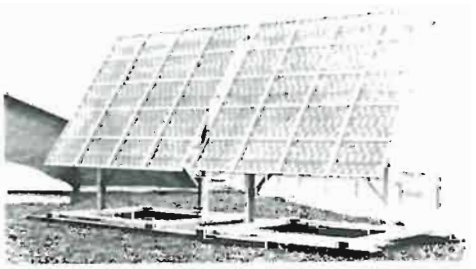
Gli altri vantaggi sono:

— possibilità di impiegare un motore di potenza elevata nel caso in cui ciò consentisse di avere un rendimento superiore a quello dato da un motore di piccola potenza
— rendere continuativa la potenza disponibile: infatti l'eccesso di energia fornita nelle ore meridiane può essere immagazzinato e utilizzato nelle ore vespertine e notturne.









Esempio d'impiego di pannelli solari Philips/Elcoma nel campo delle telecomunicazioni (Ripetitori TV, collegamenti radio a microonde — foto a sinistra in basso)

Tabella 1 ORDINE DI GRANDEZZA DEI PARAMETRI PIU' SIGNIFICATIVI DELLE BATTERIE - TAMPONE

Parametri principali	Unità di misura	Al Nichel - Cadmio sigillata	Al Nichel - Cadmio aperta	Al piombo sigillata	Al piombo piombo-antimonio	Al piombo senza piombo
Unità di capacità						
minima	Ah	0.01	10	1	10	20
massima	Ah	15	1500	10	200	2000
Velocità di scarica	h	10	5	20	20	10
Cicli carica/scarica*		>500	>1000	>250	>250	>1000
Intervallo manutenzione	mesi		6		6	12
Durata di vita	anni	10	10...25	4	5	20...25
Ritenzione della carica	%/mese	35	35	3	10...30	1.5...3
Temperatura di lavoro						
minima	°C	—20	—20	—20	—20	—20
massima	°C	+45	+45	+45	+60	+50

* La scarica non dovrà essere inferiore alla minima percentuale di capacità specificata

La scelta dell'accumulatore più adatto per un determinato impiego deve tener conto di molti fattori.

Per prima cosa l'accumulatore dovrà essere scelto in maniera da adattarsi sia all'intensità della corrente fornita dai pannelli sia a quella richiesta dal carico; la sua capacità dovrà inoltre essere tale da fornire corrente durante tutto il periodo in cui i pannelli non forniranno energia. In proposito è consigliabile prevedere un ampio margine. Bisogna inoltre tener presente che un'elevata intensità di corrente da parte dell'accumulatore potrà essere ottenuta solo a spese di una scarsa ritenzione di carica da parte del medesimo.

In molti casi, rivestirà particolare importanza anche il fattore manutenzione dell'accumulatore.

Un altro fattore che influisce sulla scelta dell'accumulatore è il *clima* del luogo dove dovrà essere installato l'impianto; fattore quest'ultimo che si riallaccia alla maggiore o minore lunghezza dei periodi in cui i pannelli non potranno fornire corrente.

Essenzialmente due sono i tipi di accumulatori adatti per impianti a pannelli solari.

— le batterie al nichel-cadmio
— gli accumulatori al piombo.

Di questi due tipi esistono molte versioni, ciascuna avente i suoi particolari vantaggi. Nella tabella 1 abbiamo riportato le versioni più correnti di entrambi i tipi. I dati caratteristici riportati sono stati ottenuti facendo la media di quelli forniti dai vari costruttori; quest'ultimi dovranno comunque essere interpellati prima di effettuare la scelta definitiva.

Batterie al nichel-cadmio

Ermeticamente chiuse

Le batterie al nichel-cadmio (Ni-Cd) ermeticamente chiuse (o sigillate) sono adatte per piccoli impianti. Hanno lunga durata in quanto sopportano agevolmente ripetuti cicli di carica-scarica. Essendo sigillate sono particolarmente adatte per impianti mobili. Tra gli svantaggi possiamo enumerare una scarsa ritenzione di carica specialmente quando risultano caricate al massimo ed un basso valore di capacità (basso valore di amper-ore).

Non ermeticamente chiuse

Le batterie al nichel-cadmio non ermeticamente chiuse hanno capacità elevate (elevato numero di amperore). Richiedono una certa manutenzione, in compenso hanno una durata di vita molto lunga, fino a 20 e 25 anni. Possono tollerare la completa scarica senza essere danneggiate e possono sopportare moltissimi cicli di carica-scarica. La loro densità di energia è elevata, e quindi sono particolarmente adatte per impianti di piccole dimensioni. Come quelle sigillate, così anche queste non hanno una buona ritenzione di carica.

Accumulatori al piombo

Ne esistono molti tipi, ma per l'impiego in impianti a pannelli solari, questi possono ridursi essenzialmente a tre.

Tipi ad elettrolita solido

Questo tipo ha bassa capacità e pertanto sarà particolarmente adatto per quelle applicazioni nelle quali la carica e la scarica risulteranno ben bilanciate. Può essere impiegato un elettrolita gelatinoso oppure un elettrolita combinato con materiale assorbente così da evitare tutti gli inconvenienti caratteristici degli accumulatori ad elettrolita liquido. Gli accumulatori a elettrolita solido sono quindi molto adatti per impianti mobili. Non richiedono manutenzione e tengono bene la carica. La loro durata di vita può essere ridotta qualora la scarica raggiunga il 50% della capacità in amperore.

Tipi senza antimonio

Gli accumulatori al piombo senza antimonio o a basso contenuto di quest'ultimo, vengono impiegati in impianti che richiedono capacità elevate e mantenimento della carica per lunghi periodi. Tengono molto bene la carica; hanno una lunga durata di vita; tollerano senza danno molti cicli di carica-scarica ed hanno un buon rendimento. Richiedono poca manutenzione, e pertanto sono molto adatti ad essere impiegati in impianti a pannelli solari. La loro bassa densità di energia può in alcuni casi essere un inconveniente.

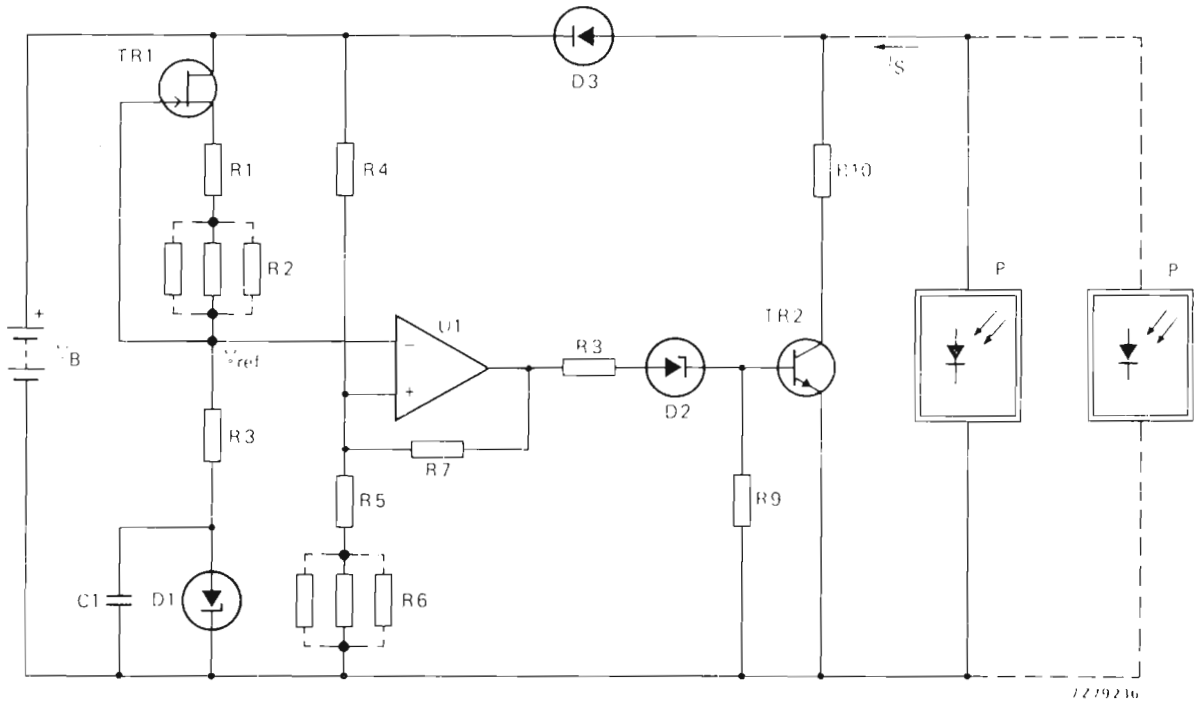


Fig. 4 - Regolatore in parallelo progettato per essere collegato all'uscita di uno o due pannelli BPX 47A.
Elenco dei componenti:

U1 μA741T
TR1 BFW10
TR2 BDX65 (con accessori di montaggio 56201)
D1 BZX75-C2V8
D2 BZX75-C2V8
D3 BYX25
C1 100 nF
R1 1kΩ
R2 regolare per V_{ref} = 3 V
R3 332Ω
R4 10.7 kΩ
R5 2.1 kΩ
R6 Regolare in modo che TR2 commuti in corrispondenza di V_B = 13,5 V
R7 78,7 kΩ
R8 1,1 kΩ
R9 750Ω
R10 vedi testo

Tutti i resistori sono del tipo MR25 serie E-96 "metal film"

Tipi al piombo-antimonio

L'aggiunta del 15% circa di antimonio al piombo delle piastre (elementi) di un accumulatore al piombo ad elettrolita liquido tende ad indurire le piastre stesse e consente quindi di ottenere elevati picchi di corrente di scarica. Sfortunatamente, la presenza di antimonio tende a ridurre la ritenzione della carica; riduce inoltre il numero dei cicli di carica-scarica, e di conseguenza, abbrevia la vita dell'accumulatore. Il grado di manutenzione dipende dal tipo di marca impiegato. Questi accumulatori vengono usati principalmente come *starter*.

Esempio di impianto a 4 pannelli solari BPX 47A. E' stato installato dalla SIP (III Zona) per un collegamento sperimentale telefonico monocanale (Passo Godi - Pescasseroli)

Il regolatore di carica

Il regolatore di carica serve a proteggere la batteria; ciò è particolarmente necessario in impianti installati in luoghi remoti, non facilmente accessibili e per i quali occorre prevedere un minimo di manutenzione. Il regolatore permette inoltre di adattare il sistema dei pannelli al carico, migliorando il rendimento del sistema e riducendone i costi. Essenzialmente esistono due tipi di regolatori: uno inserisce in parallelo all'uscita dei pannelli, un resistore tutte le volte che l'accumulatore raggiunge la tensione di fine carica; l'altro "apre" il circuito d'uscita dei pannelli tutte le volte che l'accumulatore risulta completamente caricato.

La maggior parte dei regolatori opera secondo il primo principio: tende cioè a mantenere costante la tensione di fine carica dell'accumulatore dissipando in un resistore l'energia in eccesso. In ambienti a temperatura elevata, quest'ultimo fatto può dare inconvenienti. I *regolatori in parallelo* (così infatti vengono chia-

mati questi regolatori) vengono pertanto per lo più impiegati in impianti a bassa potenza (meno di 80 W).

Negli impianti a potenza elevata si preferisce impiegare il *regolatore serie*, che "apre/chiude", a seconda dei casi, il circuito d'uscita dei pannelli; questo tipo di regolatore non dà, ovviamente, problemi di dissipazione e di surriscaldamento.

Qui di seguito forniremo le linee di progetto di un *regolatore in parallelo*, particolarmente adatto per impianti di piccola potenza impieganti uno o due pannelli BPX 47A; esso è in grado di proteggere celle e pannelli.

Progetto di un regolatore in parallelo

Il circuito è riportato in fig. 4. Il regolatore è progettato per proteggere un impianto formato da uno o due pannelli. Fondamentalmente esso è costituito da un comparatore, (amplificatore operazionale) e da un interruttore (transistore darlington). Questo tipo di "interruttore" è molto più semplice di un interruttore costituito da un tiristore in parallelo.

Il funzionamento è il seguente:

Quando l'accumulatore ha ragiunto la tensione di fine-carica, un "interruttore" formato dal darlington TR2 pone in parallelo all'uscita dei pannelli il resistore R10.

Il darlington è "chiuso", a sua volta, dall'amplificatore operazionale U1 che funziona, come già detto, da comparatore. La tensione dell'accumulatore V_B viene applicata all'ingresso positivo dell'operazionale tramite il partitore di tensione R4/R5. La reale tensione di lavoro viene messa a punto agendo su R6. La tensione di riferimento V_{ref} per il comparatore è ottenuta dal diodo regolatore di tensione D1 e il resistore R3 disaccoppiato mediante C1. La corrente che attraversa il circuito di riferimento viene stabilizzata dalla sorgente di corrente TR1; il suo valore viene messo a punto agendo su R2 in modo da avere una V_{ref} = 3 V.

Il valore di V_{ref} viene scelto tenendo presente che il coefficiente di temperatura di D1 corrisponda al coefficiente di temperatura dell'accumulatore usato. Il diodo regolatore di tensione BZX75 C2V8 possiede un coefficiente di temperatura pari a —6 mV/°C. L'accumulatore, a sua volta, ha un coefficiente di temperatura di —6 mV/°C per elemento ad una tensione di 2,25 V per elemento.

Avremo pertanto:

$$V_{ref} = 2{,}25 \times (8/6)$$
$$= 3\ \text{V}.$$

I valori del partitore di tensione all'ingresso dell'amplificatore operazionale sono scelti in maniera che la uscita diventa ALTA quando la tensione dell'accumulatore ha raggiunto il valore di fine carica, valore, che per l'accumulatore scelto è 13,5 V; per cui avremo:

$$\frac{R5 + R6}{R4 + R5 + R6} = \frac{3}{13{,}5}$$

Il transistore-interruttore TR2 deve "chiudersi" in maniera decisa in modo da ridurre al minimo la sua dissipazione.

Per ottenere ciò occorre prevedere per V_B una certa isteresi; V_B determina infatti l'entrata in conduzione del transistore-interruttore TR2. Il circuito di fig. 4 è stato dimensionato per un'isteresi di 1,2 V. La fluttuazione della tensione d'uscita dell'amplificatore operazionale è limitata internamente a circa 9 V. Tenendo presente questo valore e quello dell'isteresi ammessa, sarà possibile calcolare il valore del resistore di reazione R7.

Avremo pertanto:

$$R7 = R4\ (9/1{,}2)$$

Siccome R4 ha il valore di 10.7 kΩ, R7 assumerà il valore di 80,25 kΩ: il valore standard più vicino (serie E48) sarà 78,7 kΩ.

Per il transistore interrutore TR2 si è usato il darlington BDX65; il guadagno in corrente di questo transistore (> 1000) consente infatti il pilotaggio diretto da parte dell'amplificatore operazionale. L'apertura (switch-off) di TR2 è assicurata dal diodo regolatore D2 presente nel circuito di base.

Un radiatore di calore con resistenza termica di 10 °C/W deve ritenersi del tutto adeguato fino a quando TR2 lavora ad una temperatura ambiente di 70 °C. Si consiglia di impiegare gli accessori di montaggio raccomandati. Questo circuito-regolatore è in grado di deviare *tutta* la corrente erogata da due pannelli BPX 47A.

Il dispositivo che protegge i pannelli nei confronti della corrente inversa proveniente dalla batteria è costituito dal diodo D3 il quale dovrà essere montato sullo stesso radiatore di calore sul quale si trova il transistore-interruttore TR2.

Come già precisato (I parte) quando abbiamo illustrato l'area di funzionamento sicuro dei pannelli (SOAR), la tensione ai capi di ciascun pannello dovrà rimanere al di sopra di 10 V. E' per questa ragione che a R10 occorrerà assegnare un valore più elevato possibile; tale valore dovrà comunque soddisfare alla relazione:

$$V_{CE\,(sat)}\ TR2 + I_{s\,(max)}\ R10 < V_{B\,(min)} + V_F\,(D3)$$

Se il resistore R10 ha una tolleranza del 5% avremo:

$$R10\,(nom) = \frac{V_{B\,(min)} + V_F\,(D3) - V_{CE\,(sat)}\ TR2}{1{,}051\ I_{s\,(max)}}$$

Ora, siccome

$$V_{B\,(min)} = V_{B\,(max)} - \text{isteresi},$$

e ammettendo un valore di 0,3 V di tolleranza nel circuito "sensing" avremo:

$$V_{B\,(min)} = 13{,}5 - 1{,}2 - 0{,}3$$
$$= 12\ \text{V}.$$

Per ogni pannello vale:

$V_F\,(DR) = 0{,}6$ V
$V_{CE\,(sat)}\ TR2 = 1{,}7$ V
$I_{s\,(max)} = 0{,}75$ A

Si conclude pertanto che quando viene impiegato *un solo* pannello, R10 dovrà avere il valore di 13 Ω/10 W mentre quando vengono impiegati due pannelli i resistori dovranno essere due da 13 Ω/5 W collegati in parallelo; in entrambi i casi, i resistori dovranno essere a filo.

Si tenga presente che i calcoli suddetti presuppongono la conoscenza della tensione di fine-carica del particolare accumulatore usato, le tensioni sotto carico e l'entità dell'influenza della temperatura su di esse. In fig. 4 sono riportati i valori dei componenti impiegati.

Circuiti per l'azionamento di motori

In molti casi, il sistema di pannelli solari viene usato per azionare un motore al quale per incominciare a girare occorre gran parte della sua massima potenza; una volta avviato; il motore richiederà una corrente meno intensa. Un tipico esempio è rappresentato da un sistema destinato ad azionare una pompa; quest'ultima, com'è noto, prima di iniziare a fornire acqua dovrà, come si suol dire, "caricarsi". In questi casi, il motore potrà mettersi in movimento solo se ad esso sarà fornita la massima uscita che il sistema di pannelli può dare. Evidentemente, questa massima uscita, i pannelli la potranno fornire solo per un breve periodo della giornata.

Per risolvere questo problema, occorrerà munire il motore di un *circuito di azionamento* capace di fornire al motore la *corrente di spunto* richiesta anche quando i pannelli sono poco irradiati. In questi casi infatti, senza un adatto circuito di azionamento, il motore potrà "girare" solo nelle ore meridiane, a meno di potenziare il sistema con un elevato numero di pannelli.

Il circuito di azionamento di cui stiamo parlando consiste essenzialmente in un *condensatore* che viene caricato dalla corrente fornita dai pannelli. Il condensatore verrà, a sua volta, fatto *scaricare sul motore* sotto forma di *impulsi di corrente* sufficienti a fornire la coppia di spunto. La durata degli impulsi dipenderà dalla velocità con cui il condensatore viene, a sua volta, ricaricato dai pannelli. Se la corrente d'uscita dei pannelli è poco intensa, gli impulsi di corrente saranno di breve durata ed il motore girerà lentamente. Via via però che la corrente di uscita dei pannelli aumenta, aumenterà anche la durata degli impulsi, ed il motore tenderà ad accelerare. Il valore minimo della corrente potrà essere facilmente calcolato una volta noti il carico e le caratteristiche del motore.

Si tenga presente che quando un sistema di pannelli solari viene impiegato per azionare una pompa per l'acqua, la funzione di immagazzinamento dell'energia è rappresentato *dallo stesso serbatoio dell'acqua*, e di conseguenza, non saranno richiesti nè l'accumulatore nè il relativo regolatore di carica.

Circuito di azionamento per motori in continua

La fig. 5 riporta un circuito di azionamento di un motore in corrente continua costituito da un circuito integrato LOCMOS HEF4583B che incorpora due circuiti trigger di Schmitt. Insieme a TR4, TR5 e C2, l'integrato U1 forma un generatore di onde triangolari. Se il terminale d'uscita 4 di U1 è BASSO, il condensatore C2 viene caricato tramite il transistore TR4.

Quando la tensione ai capi di C2, "sentita" dal terminale 9, supera un livello prestabilito, il terminale 4 diventa ALTO, e C2 potrà scaricarsi attraverso TR5. Quando la tensione sul terminale 9 scende al di sotto

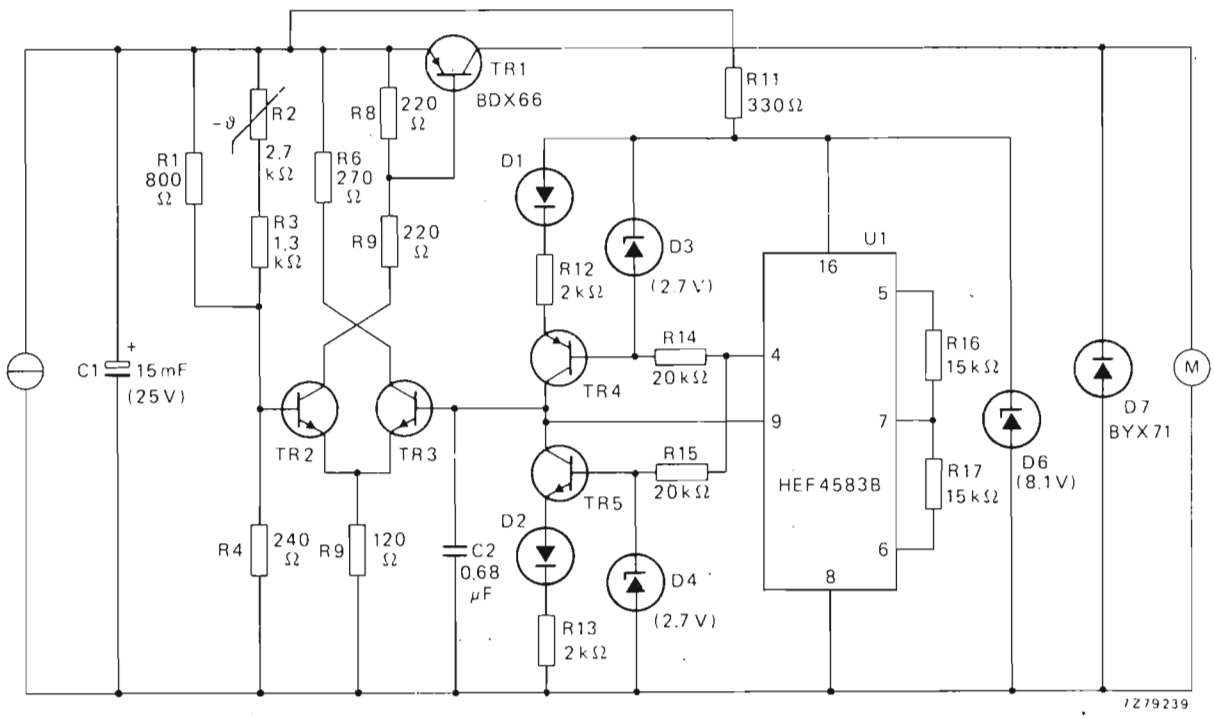


Fig. 5 - Circuito di azionamento per un motore in corrente continua

Esempio di piccolo impianto a pannelli solari impiegato per l'alimentazione delle apparecchiature di una colonnina di soccorso lungo l'autostrada Roma - L'Aquila. (Impianto realizzato dalla Divisione Telecomunicazioni della Philips S.p.A.)

di un secondo livello più basso, avremo un'altra commutazione di U1; il terminale 4 diventerà nuovamente BASSO e il ciclo di funzionamento si ripeterà.

Le tensioni di soglia rispettivamente superiore e inferiore vengono fissate da R16 e R17. Il livello medio delle forme d'onda è metà della tensione ai capi di D6 (= 8,1/2 V). La sua frequenza di ripetizione è determinata da C2, R12, R13.

La tensione ai capi di C2 viene applicata alla base di TR3 il quale insieme a TR2 forma una coppia a "coda lunga". La base di TR2 è alimentata da un partitore di tensione collegato ai capi di C1 il quale, a sua volta, risulta collegato in parallelo ai terminali d'uscita dei pannelli. Quando il valore istantaneo del dente di sega presente ai capi di C2 supera la tensione applicata alla base di TR2, entra in conduzione solo TR3, e TR1 viene bloccato.

Viceversa, quando il livello del dente di sega scende al di sotto della tensione presente sulla base di TR2 solo quest'ultimo entrerà in conduzione, e di conseguenza, anche il transistore-interruttore TR1 "si chiuderà". Si tenga presente che "l'apertura" e la "chiusura' del transistore - interruttore TR1 dipende esclusivamente dalla *relazione* intercorrente tra le tensioni applicate alle basi di TR2 e TR3, e non dai loro assoluti valori.

Il campo della tensione di controllo presente su C1 è circa 1,5 V, valore quest'ultimo centrato sulla migliore tensione di lavoro dei pannelli. Siccome questo valore ottimo di tensione dipende dalla temperatura, il partitore di tensione che alimenta la base di TR2 dovrà comprendere anche il resistore NTC R2. Ciò consentirà di ottenere il migliore funzionamento entro un'ampia gamma di variazioni della temperatura. A livelli elevati di insolazione, l'energia assorbita da C1 risulterà inferiore a quella fornita dai pannelli: in queste condizioni, TR1 risulterà sempre in conduzione.

Via via però che la radiazione diminuirà, la tensione ai capi di C1 assumerà valori compresi entro il campo di controllo; TR1 comincerà ad "aprirsi e chiudersi", e di conseguenza, il motore girerà a velocità più ridotte.

Circuito di azionamento per motori in alternata

E' noto che i motori trifase a gabbia di scoiattolo presentano indubbi vantaggi sui motori in corrente continua. Essi infatti non richiedono manutenzione; sono strutturalmente più semplici, e di conseguenza, meno costosi; sono disponibili in un'ampia gamma di potenze,

ed infine hanno, in genere, un rapporto potenza/peso migliore di quello dei motori in continua.

Queste caratteristiche li fanno preferire a quelli in continua; specialmente nel caso in cui vengano installati in posizioni poco accessibili, come per esempio succede nelle pompe ad immersione.

Come i motori in continua, così anche i motori in alternata a gabbia di scoiattolo richiedono, allo spunto, una corrente superiore a quella di regime. Di conseguenza, per alimentare questi motori con un sistema a pannelli solari occorrerà produrre una corrente trifase ad impulsi molto intensi, tutte le volte che diminuisce l'intensità della radiazione. In questo modo, la coppia del motore sarà mantenuta bassa a bassi valori di velocità e a bassi livelli d'insolazione.

La fig. 6 indica gli elementi essenziali di un circuito di azionamento in grado di produrre correnti trifasi a frequenza fissa; le correnti sono ad impulsi a larghezza variabile. Il funzionamento è il seguente. Il condensatore C1 viene caricato dai pannelli solari. Un alimentatore stabilizzato a commutazione (leggero, a rendimento elevato, dal funzionamento sicuro) trasforma una parte della potenza d'uscita dei pannelli in una tensione continua a 28 V che alimenterà l'unità di controllo. Il resistore R1 fa da carico ai pannelli fino a che l'uscita di quest'ultimi non sarà sufficiente a far partire il motore. Raggiunto questo scopo il resistore viene automaticamente escluso dal circuito. In questa maniera si impedisce che il motore inizi a girare prima che l'uscita dei pannelli non risulti superiore alla corrente di mantenimento dei tiristori. Il circuito impedisce anche che i tiristori possano innescarsi non a tempo debito, evitando in questa maniera danni irreparabili. Un resistore NTC, presente nell'unità di controllo, fa sì che il

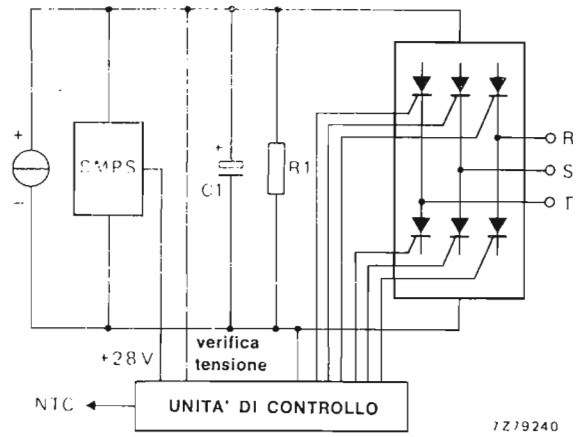


Fig. 6 - Elementi essenziali di un circuito di azionamento per motore trifase a gabbia di scoiattolo

punto di lavoro del sistema si mantenga sempre sul punto di massimo rendimento entro un ampio campo di variazioni di temperatura. L'uscita del sistema, pressapoco 300 V, viene applicata all'unità di controllo che rivela il livello di potenza disponibile.

IL FUTURO DEI SISTEMI A PANNELLI SOLARI

Con il miglioramento delle tecnologie di produzione, il costo attualmente abbastanza elevato dei pannelli solari è destinato sicuramente a diminuire. Questo è un

Altro esempio di impianto a pannelli solari impiegato per l'alimentazione delle apparecchiature di una colonnina di soccorso lungo un'autostrada

fatto su cui si può contare dato che si è verificato puntualmente con tutti i tipi di dispositivi a semiconduttori, circuiti integrati compresi.

Anche la potenza sviluppata dagli impianti a pannelli solari è in crescente aumento: dalle decine di watt dei primi impianti si è già arrivati alle centinaia di watt, e attualmente ci si sta avvicinando al chilowatt. Ciò, grazie all'introduzione dei nuovi pannelli BPX 47B-18 (16,5 W), BPX 47B-20 (18,3 W) e BPX 47C (33 W).

Le attuali tecniche circuitali consentono di trasformare (con poca spesa e ottimo rendimento) l'energia elettrica fornita dai pannelli in tensioni continue o alternate, quest'ultime a qualsiasi frequenza. L'energia elettrica fornita dall'impianto può ovviamente essere convertita in altre forme di energia (termica, meccanica ecc.).

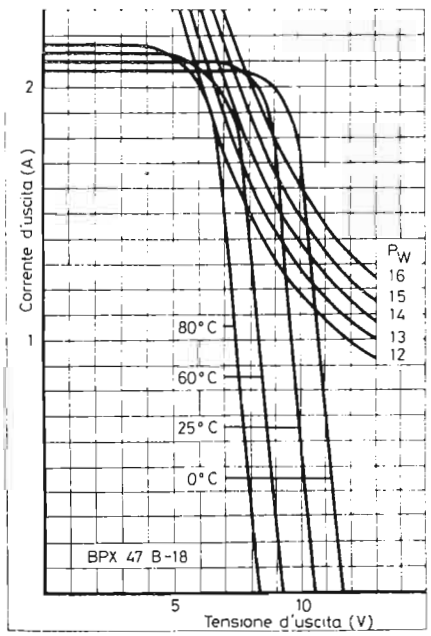
E' evidente però che l'energia elettrica fornita da un sistema a pannelli solari ancora per qualche tempo non sarà competitiva con quella fornita dalla rete. Ci sono però dei luoghi, (e questo l'abbiamo sottolineato all'inizio di questo lavoro), nei quali, date le ridotte potenze richieste, è poco economico portare l'energia elettrica mediante la convenzionale rete di distribuzione (ci riferiamo ai ripetitori radio TV, ai fari situati in luoghi poco accessibili ecc.). Ci sono inoltre alcune attività (estrazione da miniere, processi di raffinazione ecc.) che in molti casi si trovano in zone sperdute e lontane dalla rete di distribuzione di energia elettrica. Tali attività "consumano" grandi quantità di energia. Se queste attività si trovano in luoghi a forte irradiazione solare, può darsi che la lavorazione di questi minerali, effettuata sul luogo della loro estrazione impiegando energia elettrica ricavata da sistemi a pannelli, risulti economicamente fattibile, per cui sarà possibile trasportare solo il prodotto raffinato. Si tenga presente d'altra parte che il trasporto di materiale *grezzo* richiede energia.

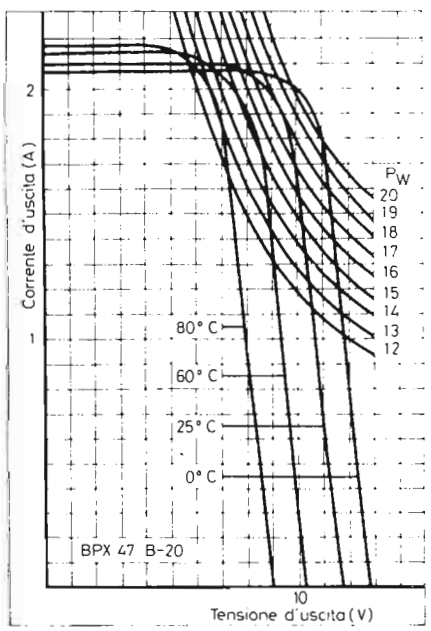
Resta comunque un fatto inoppugnabile: sotto la spinta dell'attuale crisi energetica, lo studio e la tecnologia di produzione di celle solari faranno *decisivi passi in avanti come rendimento e come prezzo*. A questo punto l'energia fornita dal sole, trasformata in energia elettrica dai sistemi a pannelli potrà rappresentare una considerevole percentuale dell'energia attualmente necessaria all'uomo.

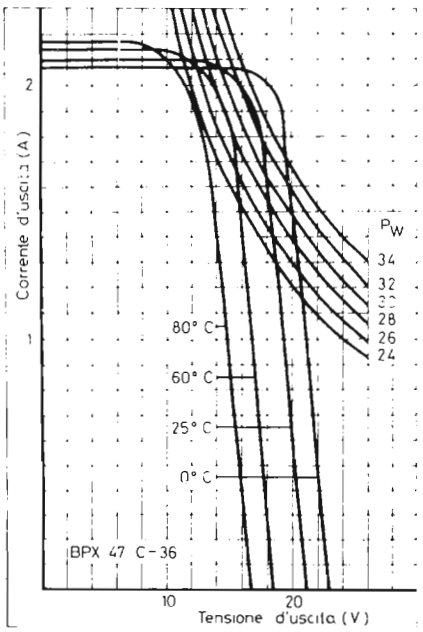
DATI CARATTERISTICI ESSENZIALI DEI NUOVI PANNELLI SOLARI PHILIPS - ELCOMA

	Dimensioni (mm)	Peso (kg)	CARATTERISTICHE ELETTRICHE Temperatura della cella 25° C ; Irradiazione solare 1 kW m²				
			Tensione a circuito aperto	Corrente di corto circuito	Corrente alla massima potenza	Tensione alla massima potenza	Potenza massima
BPX 47 B-18	584 x 468 x 15	4	10.5 V	2.1 A	2.01 A	8.2 V	16.5 W
BPX 47 B-20	584 x 468 x 15	4	11.6 V	2.1 A	2.01 A	9.1 V	18.3 W
BPX 47 C	1 055 x 428 x 47	11	21.2 V	2.1 A	2.01 A	16.4 V	33.0 W

Temperatura della cella ~ temperatura ambiente + 15 C







REGOLE PRATICHE PER IL CORRETTO IMPIEGO DEI PANNELLI SOLARI

PREFACE

QUE PEUT-ON ESPERER DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE ?

Quelques chiffres situent d'emblée les possibilités du procédé.

En Arabie Saoudite avec une irradiation moyenne de 800 kJ/ cm^2 / an, une surface de 100 m^2 couverte de jonction de silicium ayant un rendement de 10 %, procure annuellement 22,2 MWh.

Si l'on consacre cette puissance au pompage de l'eau avec un rendement électromécanique de 40 %, c'est 36 T d'eau par heure à 20 m que l'on pourra monter pendant la demi-journée.

D'une façon plus générale, pour des pays compris entre des latitudes de 20° à 45°, l'énergie globale arrivant du soleil à la surface du sol est en moyenne de 1500 à 2000 kWh/ m^2/ an.

La même toiture de 100 m^2 permettrait alors de satisfaire largement l'équipement « tout électrique » d'un logement.

Ces deux exemples pris parmi tant d'autres, donnent un aperçu des possibilités d'application de la conversion photovoltaïque.

I - DEFINITIONS, SYMBOLES ET RAPPELS DE NOTION D'ASTRONOMIE

I.1 DEFINITIONS

- ***Cellule*** -

Générateur unitaire photovoltaïque, constitué d'une diode de grande surface en forme de disque développant une tension de l'ordre de 0,45 volt.

- ***Module*** -

Association de cellules disposées sur une surface plane et connectées en série pour obtenir une tension normalisée sur des bornes ou un câble, se raccordant sur des dispositifs de connectique normalisés.

- ***Panneau*** -

Assemblage de modules sur une structure rigide pour obtenir la puissance souhaitée par connexions parallèles ou séries-parallèles entre modules.

- ***Effet photovoltaïque*** -

Il consiste en la conversion directe du rayonnement lumineux en énergie électrique. On admet qu'un photon (particule de lumière) d'énergie $h\nu$ supérieure au saut d'énergie ΔE du semiconducteur, libère une paire d'électron-trou en cédant cette énergie à un électron de valence qui passe dans la bande de conduction.

- ***Irradiation*** -

Energie reçue par période déterminée sur une surface donnée.

Ex. : en Arabie : $800\ kJ/cm^2/an = 222\ Wh/cm^2/an$

- ***Eclairement*** -

Puissance reçue par unité de surface à un instant donné.

Ex. : $1\ kW/m^2 = 100\ mW/cm^2$ *(correspond à environ 100.000 lux).*

I.2 SYMBOLES

I_{cc} - Courant de court-circuit d'un module.

V_{co} - Tension en circuit ouvert d'un module.

P_L - Puissance du point de fonctionnement optimal d'un module.

V_L - Tension au point de fonctionnement optimal d'un module.

I_L - Courant au point de fonctionnement optimal d'un module.

η - Rendement, rapport entre l'énergie solaire reçue par une surface de silicium et l'énergie électrique convertie par cette même surface.

T_a - Température ambiante.

T_j - Température des cellules.

T_{stg} - Température de stockage.

m - Nombre d'air masse.
m = 1 correspond à la traversée verticale de l'atmosphère moyenne, dont la masse se traduit au sol par une pression de 1013 millibars.

P_p - Puissance permanente d'une station solaire.

N - Nombre de modules «BPX 47 A» associés dans une station.

H - Durée d'insolation annuelle en heures.

H_m - Durée d'insolation mensuelle en heures.

H_{cm} - Durée d'insolation mensuelle corrigée en fonction de l'inclinaison des modules.

C_T - Capacité théorique d'une batterie assurant l'autonomie d'une station.

C - Capacité réelle de la batterie associée aux photopiles.

L - Dénivellation entre fond de puits et sommet de réservoir.

E - Eclairement lumineux. L'éclairement de référence est de 1 kW/m².

J - Joule, unité d'énergie.
1 thermie 10^6 calories = 4,19 10^6 joules.
3600 joules 1 Watt-heure.

$\mathcal{L}$ - Langley - ancienne mesure anglaise d'éclairement 1 $\mathcal{L} \# \frac{1 \text{ cal}}{\text{cm}^2}$

h - Constante de Planck = $6{,}62.10^{-34}$ joules/sec.

ν - Fréquence optique de la couleur étudiée.

φ - Latitude du lieu de la station en degré.

E - Energie moyenne reçue annuellement sur un plan horizontal en kj/cm²/an.

E_c - Energie moyenne annuelle reçue sur une surface inclinée du même angle que les panneaux.

γ - Angle formé par le plan de l'équateur et le plan écliptique.

i - Inclinaison des modules par rapport à l'horizontal.

P_t - Puissance permanente théorique en Watts délivrée par un module incliné suivant la latitude du lieu.

P_u - Puissance permanente utile en Watts délivrée par un module incliné suivant la latitude du lieu et tenant compte des pertes et dispersions sur les paramètres.

I.3 RAPPELS DE NOTIONS D'ASTRONOMIE

Le barycentre de la terre décrit une ellipse ayant le soleil pour foyer. *(Figure 1).*

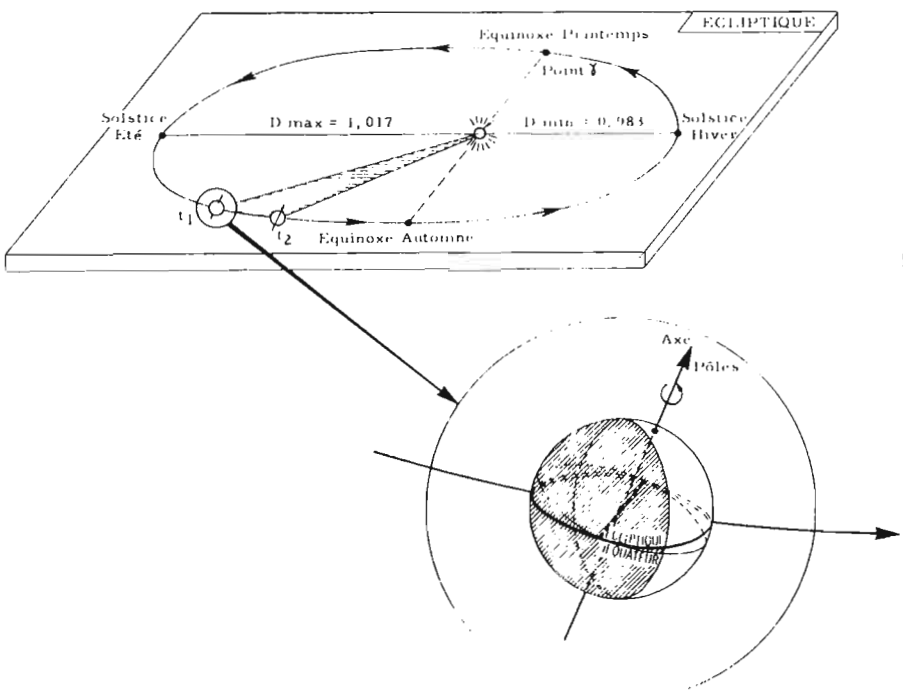


FIGURE 1 - Mouvements de la Terre autour du Soleil et sur elle-même

L'excentricité très réduite de cette ellipse est telle que la distance Terre-Soleil évolue entre :

$$0{,}983\ D \quad et \quad 1{,}017\ D$$

D étant la distance Terre-Soleil aux équinoxes de printemps et d'automne (150 millions de km, soit 8 mm de trajet lumiere).

L'éclairement solaire direct extra-atmosphérique varie donc de ∓ 3,4 % autour de la valeur moyenne de

$$1400\ W/m^2$$

mais les quantités d'énergie reçues par la terre entre les 2 solstices sont égales

Avec un rayon moyen de 6400 km, notre globe présente une surface d'interception de 1,28 10^8 km^2 et reçoit quelques 1.8 10^{11} MW en permanence sur la surface éclairée dont la rotation est de 15° par heure

La déclinaison et ses conséquences

Dans l'estimation de l'énergie utilisable sur un plan fixe, il faut tenir compte de la déclinaison solaire (angle que fait la direction du soleil avec le plan équatorial) ∓ 23° 27' aux solstices.

L'inclinaison de l'axe polaire favorise donc les pôles qui reçoivent ainsi sur un plan horizontal une énergie solaire sous une incidence qui atteint 23° 27'.

Cette énergie serait nulle aux pôles en l'absence de déclinaison.

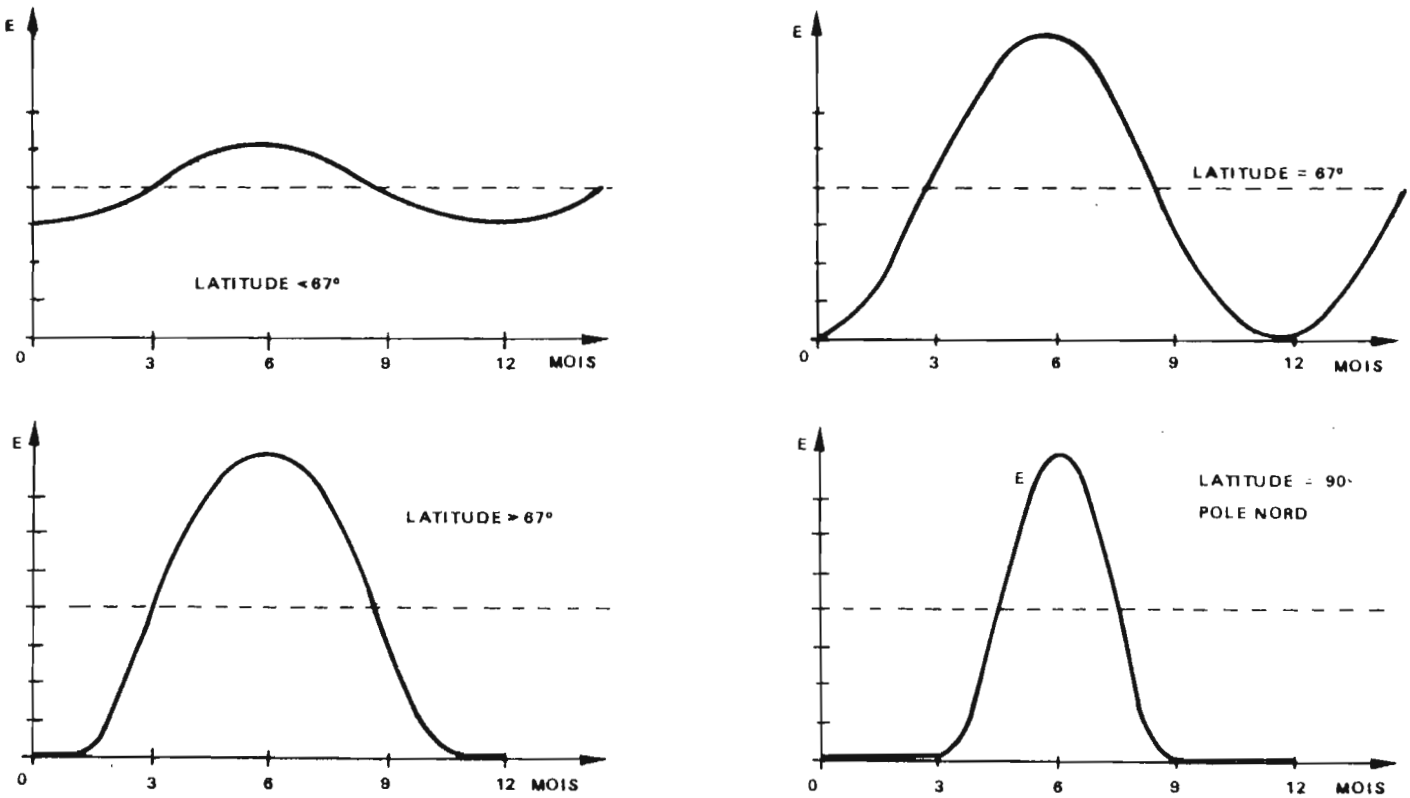


FIGURE 2

L'énergie quotidienne reçue sur un plan orienté au midi et incliné suivant la latitude évolue durant l'année conformément aux graphiques de la figure 2, relatif à l'hémisphère Nord, bien sûr pour l'hémisphère Sud, les courbes ont la même allure, mais avec un décalage des abscisses de 6 mois.

II - LE MODULE « BPX 47 A »*

II.1 DESCRIPTION

Ce module réunit 34 cellules ⌀ 57 mm ; chacune constitue une diode plane sur silicium D dont la couche supérieure N est réduite à 0,5 µm. La grille de sortie sur la surface exposée est obtenue par métallisation sous vide d'un composé titane-palladiun-argent. Une couche anti-reflet à l'oxyde de titane améliore encore le rendement de conversion.

Une résine silicone transparente enrobe ces cellules qui sont immobilisées dans une encapsulation dite « biverre ».

Une ceinture en caoutchouc synthétique assure l'étanchéité du sandwich et du câble de sortie.

Enfin, une bordure d'aluminium anodisé évite l'échauffement du caoutchouc et permet la fixation du module sur une structure.

La figure 3 montre la coupe d'un disque photovoltaïque et la figure 4 la constitution d'un module.

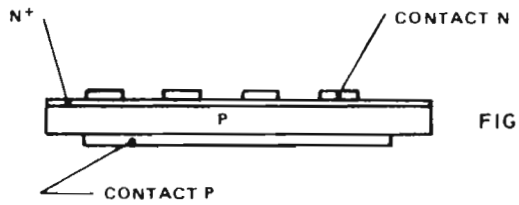
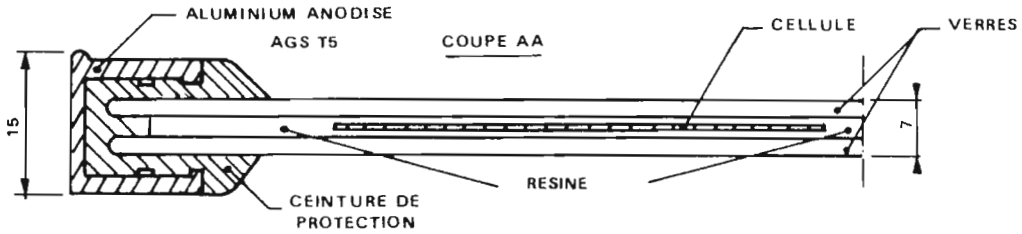


FIG. 3 - Coupe de la cellule ⌀ 57

FIG. 4 - Coupe partielle du module BPX 47 A



II.2 CARACTERISTIQUES PRINCIPALES

II.2.1 Caractéristiques électriques

Les caractéristiques électriques du module sont définies pour un éclairement au sol de 1 kW/m². (air masse 1), elles sont typiques avec une tolérance de ∓ 10 %.

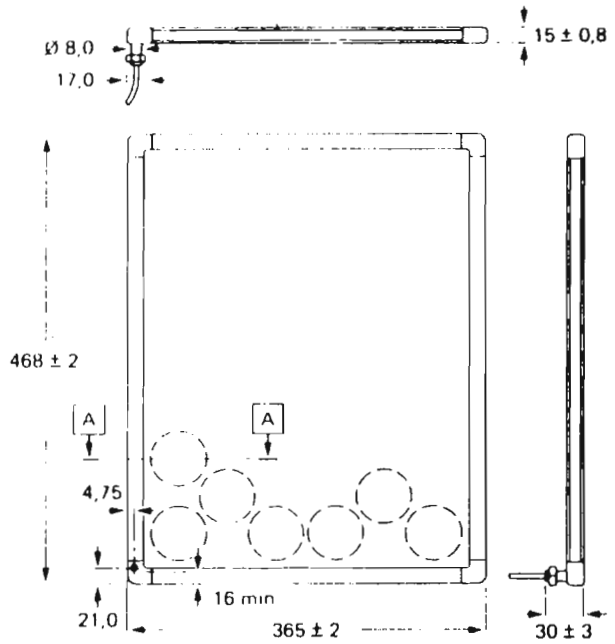
T_j	0 °C	25 °C	60 °C	
Puissance optimale P_L =	12	11	9,7	W
Tension optimale V_L =	18	15,5	14,3	V
Courant optimal I_L =	665	700 (min 645)	680	mA
Tension circuit ouvert V_{co}	22,2	20,5	18,2	V
Courant de court-circuit I_{cc}	700	720	740	mA
Cœfficient de température de tension à circuit ouvert		68 mV/°C		
Cœfficient de température du courant de court-circuit		0,64 mA/°C		
Température de stockage	− 40 + 85 °C			
Ecart entre température de cellule et température ambiante	$T_j - T_a$ = 15 °C pour une température ambiante de 45 °C			

* Queste regole e raccomandazioni valgono tenuto conto dei loro dati caratteristici anche per i nuovi pannelli BPX 47/B18 e BPX 47/C36. Il pannello BPX 47A è disponibile solo fino ad esaurimento dello stock.

II.2.2 Caractéristiques dimensionnelles

La figure 5 donne les côtes essentielles du module. (Sortie sur câble de longueur 1 m, diamètre 5,5 mm, 2 conducteurs ϕ 1,8).

FIG. 5



II.3 INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT

Le courant de court-circuit et la puissance optimale du module sont pratiquement proportionnels à l'éclairement direct reçu comme le montre la figure 6.

En l'absence de rayonnement diffus, les rayons directs ne sont pas perpendiculaires au plan du module, une réduction de I_{CC} sera constatée proportionnellement au cosinus de l'angle d'incidence.

La mesure du rayonnement incident peut s'effectuer avec un Luxmètre type Polycontrôle 94 Chauvin Arnoux dont la sonde est complétée par un filtre d'atténuation k = 100.

Avec une bonne approximation la valeur de l'éclairement global mesuré peut être estimé à 100 klux pour 1 kW/m².

Alors que le rayonnement hors atmosphère est de 1,4 kW/m², en général la puissance disponible au sol dépasse rarement 1000 W/m². L'intensité réelle du rayonnement solaire étant bien sûr fonction de :

- la localisation géographique,
- l'heure,
- la saison,
- les conditions météo (nébulosité, poussière, humidité...);
- altitude,
- etc...

Toutefois, l'éclairement global sur un site est constitué de 2 composantes, le direct et le diffus.

En pratique le courant de court-circuit du «BPX 47 A» est en valeur approchée :

$$I_{CC} \# (+720\ E\ dir. + 530\ E\ dif.)\ mA$$

E direct et E diffus étant exprimés en kW/m².

L'éclairement diffus est estimé dans une zone d'ombre et

$$E\ dir. = E\ global - E\ diffus$$

Toutefois, ceci ne doit être considéré que comme une bonne approximation, soumise aux aléas de la composition spectrale de la lumière.

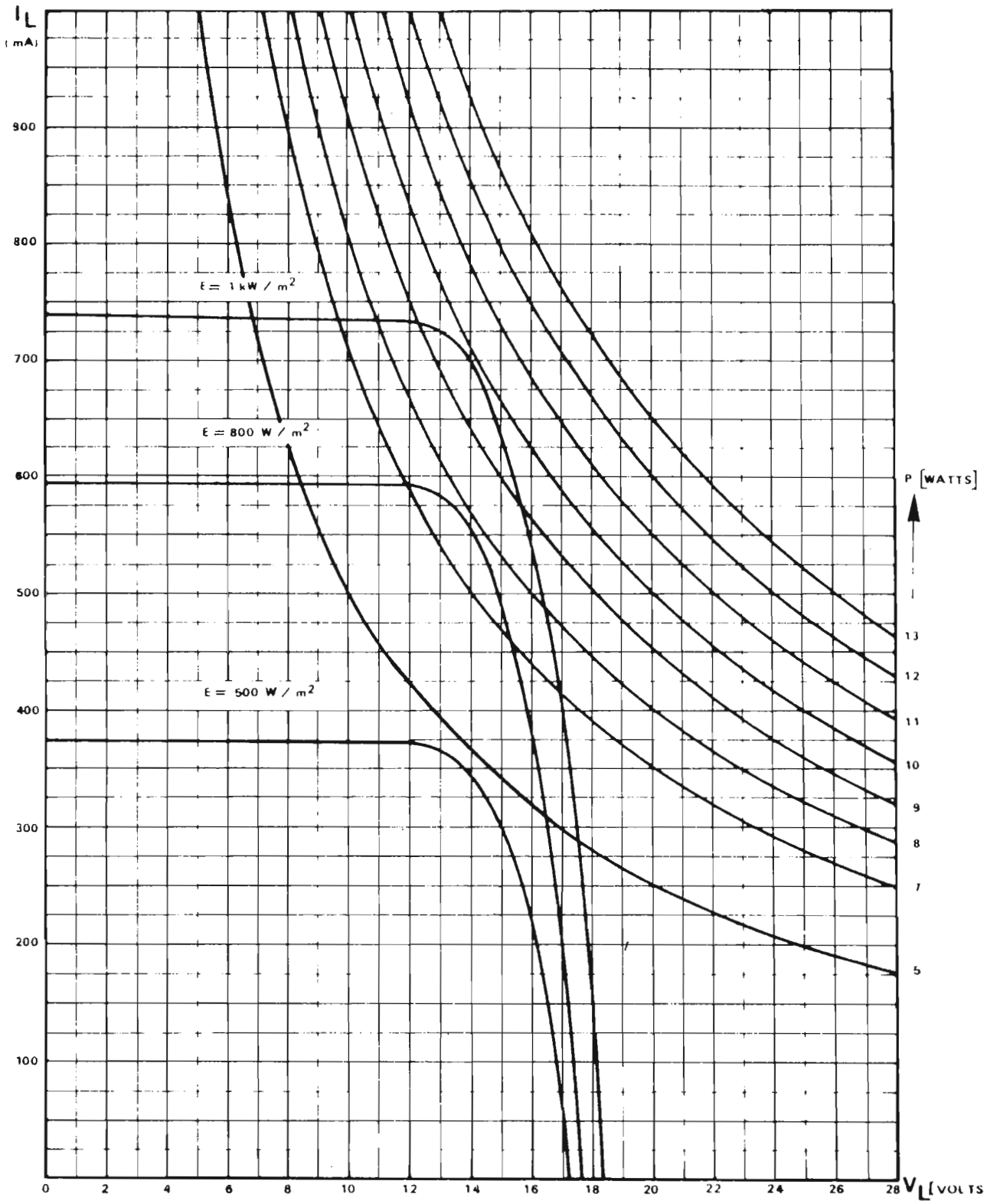


FIG. 6 - Influence de l'éclairement

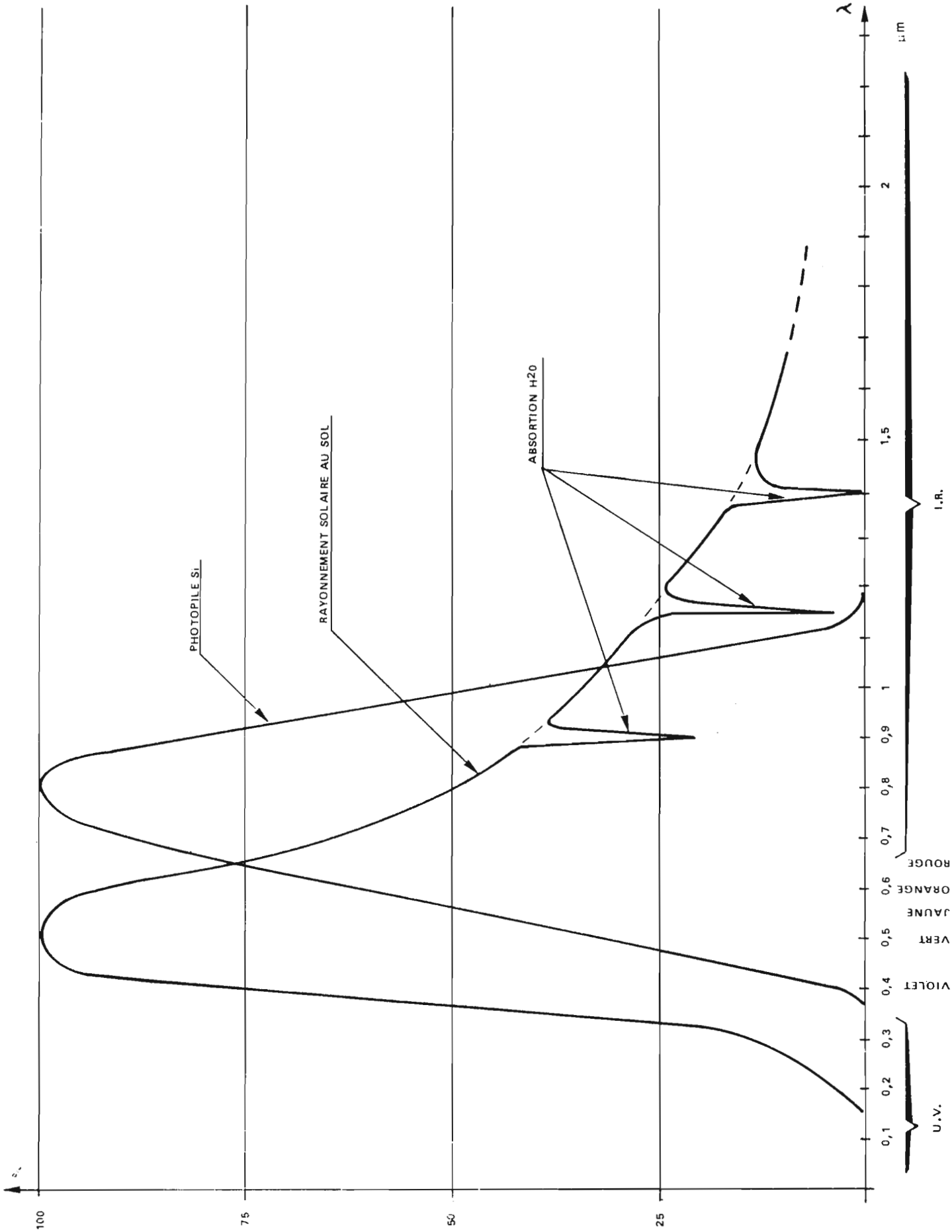

PHOTOPILE Si
RAYONNEMENT SOLAIRE AU SOL
ABSORTION H2O
100
75
50
25
λ
µm
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1
1,5
2
U.V.
VIOLET
VERT
JAUNE
ORANGE
ROUGE
I.R.

FIGURE 7

A titre indicatif les courbes de la figure 7 illustrent la réponse d'une cellule photovoltaïque au silicium vis-à-vis du spectre solaire moyen.

C'est entre 0,4 µm et 1,1 µm, c'est-à-dire dans le spectre visible et proche infra-rouge que la conversion photovoltaïque est maximale, par contre il n'y a pas de réponse en U.V.

II.4 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

Bien que le courant de court-circuit augmente avec la température, la puissance optimale d'un module se réduit avec celle-ci, car la tension V_{co} baisse notablement. (– 0,68 Volt par 10 °C).

La figure 8 donne les courbes I = f (V) pour 3 températures de cellule et situe par superposition des courbes d'équipuissance (ou de rendement), l'évolution des caractéristiques sous l'aspect thermique.

Retenir également que sous l'éclairement solaire nominal de 1 kW/m² les cellules du module « BPX 47 A » se trouvent portées à 15 °C environ au-dessus de la température ambiante.

Cette faible différence de valeur étant due à la technologie « Bi-verre » utilisée.

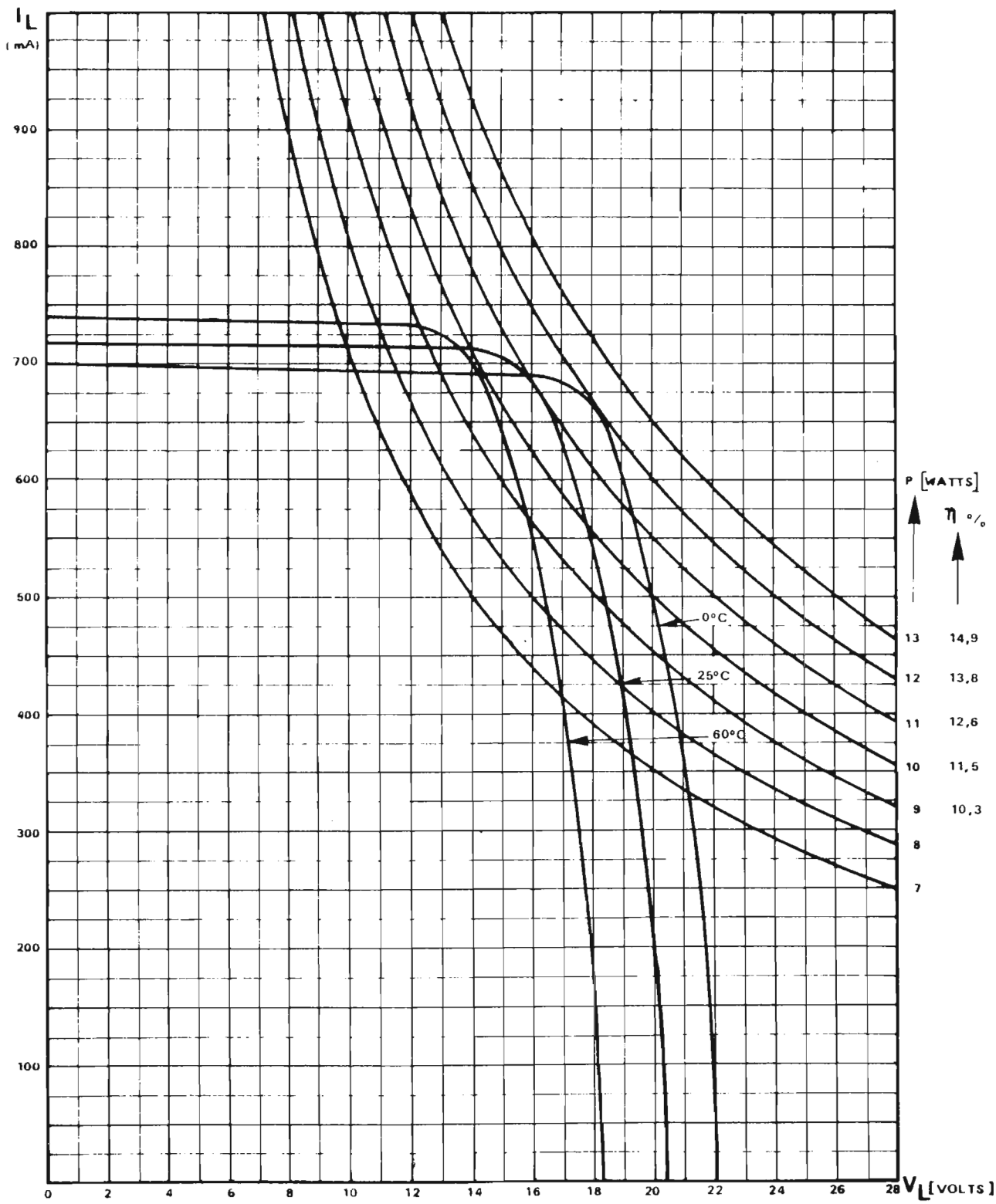

I_L
(mA)
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
26
28
V_L [VOLTS]
P [WATTS]
η %
13
14,9
12
13,8
11
12,6
10
11,5
9
10,3
8
7
0°C
25°C
60°C

FIGURE 8

II.5 ASSOCIATION MODULE ET BATTERIE

Le module «BPX 47 A» est conçu pour assurer, même sous éclairement réduit, la charge complète d'une batterie au travers d'une diode de conjonction.

Cette dernière évite que l'accumulateur débite la nuit dans la série des 34 cellules polarisées en direct.

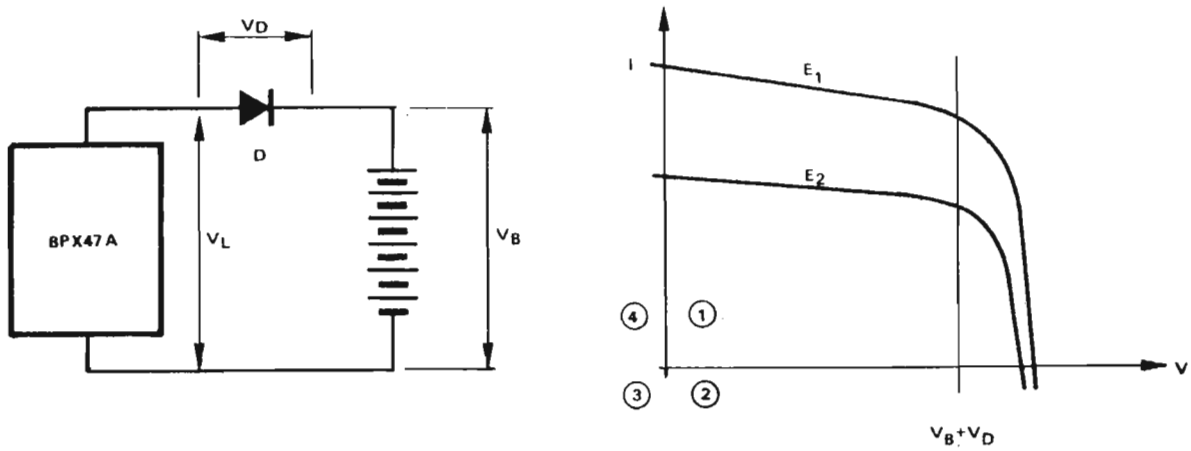


FIGURE 9

Dans cette configuration la tension de fonctionnement est imposée par la tension de batterie, à la chute de tension de diode près. (0,7 Volt environ pour BYX 42-300). Avec l'éclairement le point de fonctionnement se déplacera donc sur la verticale d'abcisse $V_B + V_D$.

L'association des modules avec batteries correspond aux applications les plus courantes.

L'on choisira le type de batterie garantissant le courant d'auto-décharge le plus réduit.

Une perte de capacité de 3 à 5 % par mois de stockage peut être retenue avec les éléments au plomb doux.

II.6 ZONE DE CONTRAINTE THERMIQUE

Lorsque le module débite sur une batterie, le courant est sensiblement inférieur à I_{CC} et la tension V est imposée par la batterie associée à la diode de conjonction.

Le module étant composé de 34 cellules, chacune contribue à créer la tension nécessaire en restant dans le quadrant générateur. (Voir figure 10 quadrant 1).

Pour une batterie normalement chargée et une dispersion réduite du I_{CC} de chaque cellule, le module «BPX 47 A» travaille dans d'excellentes conditions.

Il n'en est pas de même, si pour une raison quelconque la tension de batterie baisse ou s'annule. Le module débite alors sur court-circuit et sa tension de fonctionnement est

$$V = 0 = v_1 + v_2 + v_3 + \ldots + v_{34}$$

ceci impose soit $v_1 = v_2 = \ldots = v_{34}$ ce qui n'est possible que si les cellules ont le même I_{CC} ;

soit

$$V = 0 \text{ avec } v_1 + v_2 + v_3 + \ldots + v_{33} = - v_{34}$$

si l'une des cellules (par exemple 34) a son I_{CC} quelque peu inférieur, (voir figure 10), du fait, par exemple d'un masquage partiel de la cellule.

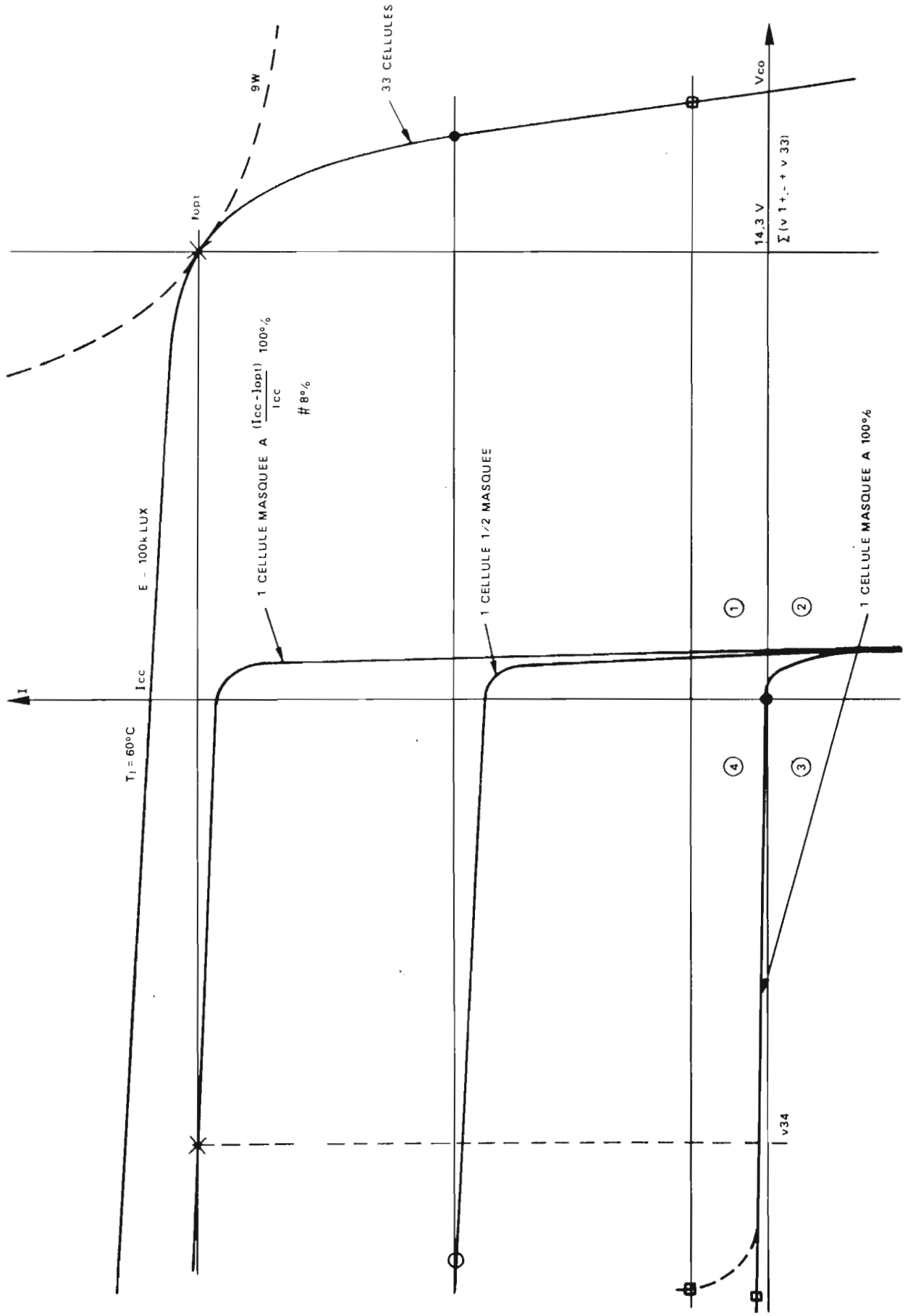

9W
33 CELLULES
Iopt
Vco
14,3 V
∑(v 1+..+ v 33)
E = 100k LUX
1 CELLULE MASQUEE A (Icc-Iopt)/Icc 100%
≠ 8%
1 CELLULE 1/2 MASQUEE
1 CELLULE MASQUEE A 100%
I
Icc
Tj = 60°C
1
2
3
4
v34

FIGURE 10

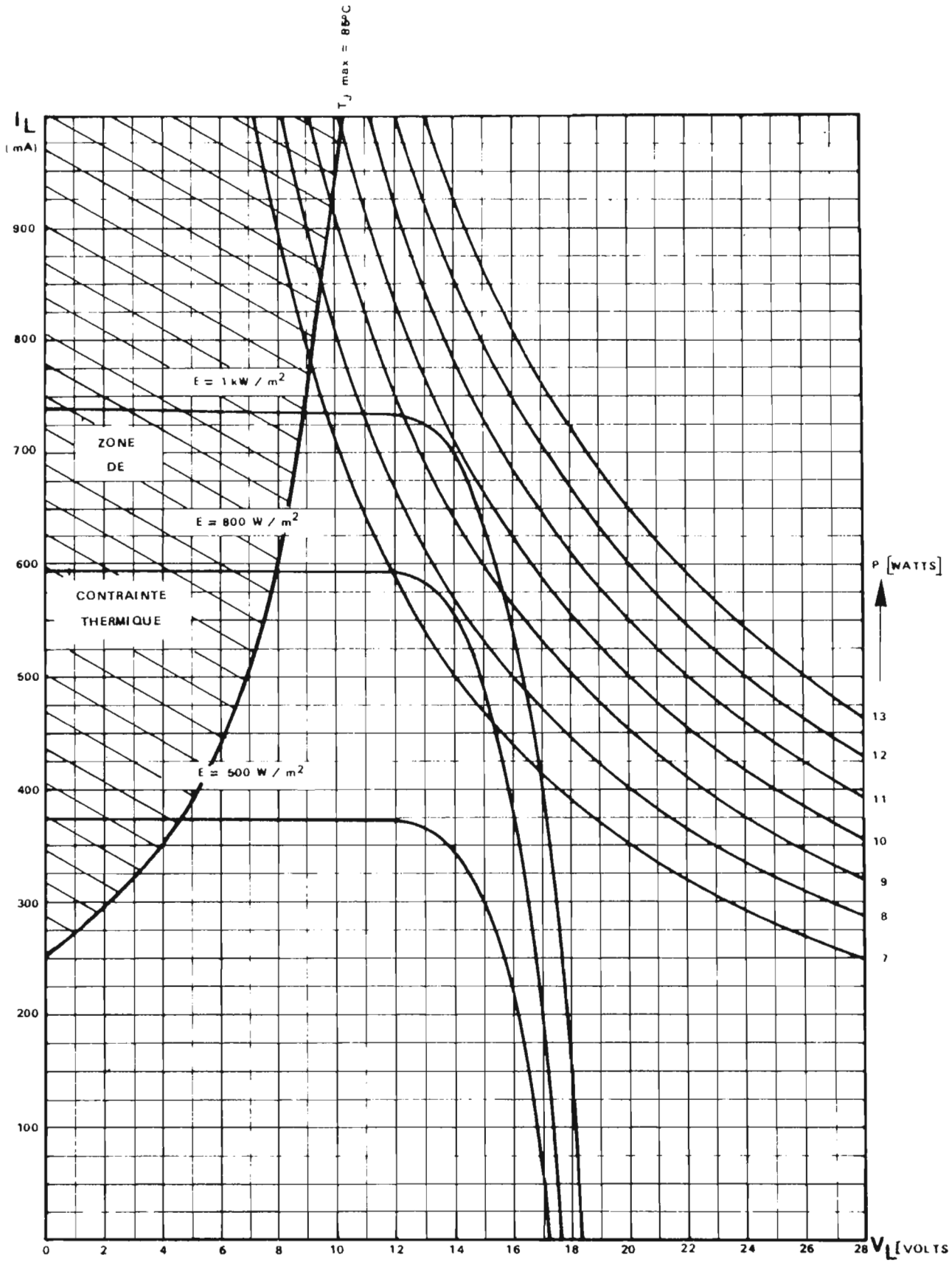


FIGURE 11

Zone de contrainte thermique du module « BPX 47 A »
la température atteinte (t_j) par la cellule partiellement
masquée est relative à t_{amb} 45 °C

Dans ce cas la cellule 34 peut supporter une tension inverse v_{34} supérieure à 14 Volts et la puissance dissipée peut atteindre

$$p_{34} \# v_{34} \times I_{opt} \# 14 \times 0,680 = 9,7 \text{ Watts}$$

c'est-à-dire la puissance nominale du module à $T_j = 60$ °C

La puissance normalement reçue sous irradiation solaire de 1kW/m² est :

$$p = \frac{9,7 \times 100}{\eta} = 87 \text{ W}$$

pour 45 °C ambiant et 60 °C de température de cellule.

Soit $\frac{87}{34}$ = 2,55 Watts par cellule.

Avec un coefficient de réflexion	5 %	⟶	0,125 W
Avec une conversion électrique	11,14 %	⟶	0,284 W
La puissance n'échauffant pas la jonction est			0,411 W

La dissipation moyenne des cellules est

$$2,55 - 0,411 = 2,139 \text{ W}$$

cette dissipation élève la température de jonction de 15 °C environ, soit une résistance thermique de 7°C/W.

Si l'on admet une température limite de la cellule et de son enveloppe de 85 °C, l'échauffement autorisé par cellule est

$$\Delta T = 85 - 60 = 25 \text{ °C}$$

soit une puissance accrue de

$$\Delta P = \frac{25}{7} = 3,57 \text{ Watts}$$

Le lieu des points de puissance maximale du module en fonction de l'éclairement étant une droite d'abcisse V = 14 V, la zone de contrainte thermique du module est délimitée par la courbe

$$V = 14 - \frac{3,57}{i}$$

Elle est représentée sur la figure 11 pour T_j max de cellule masquée à 85 °C.

REMARQUE :

La délimitation de zone de contrainte thermique repose sur l'hypothèse très improbable où une seule cellule voilée supporte toute la puissance du module. En pratique, cette zone est considérablement plus réduite et une incursion brève de quelques minutes est tolérée jusqu'à V = o.

Toutefois, si le court-circuit permanent d'un module n'est pas autorisé et il faut retenir que la pénétration dans la zone de contrainte thermique est d'autant plus préjudiciable à la durée de vie du module qu'elle est profonde et prolongée.

La figure 11 donne en fonction de l'éclairement, les tensions sous lesquelles il ne faut pas descendre pour éviter de pénétrer dans la zone de contrainte thermique

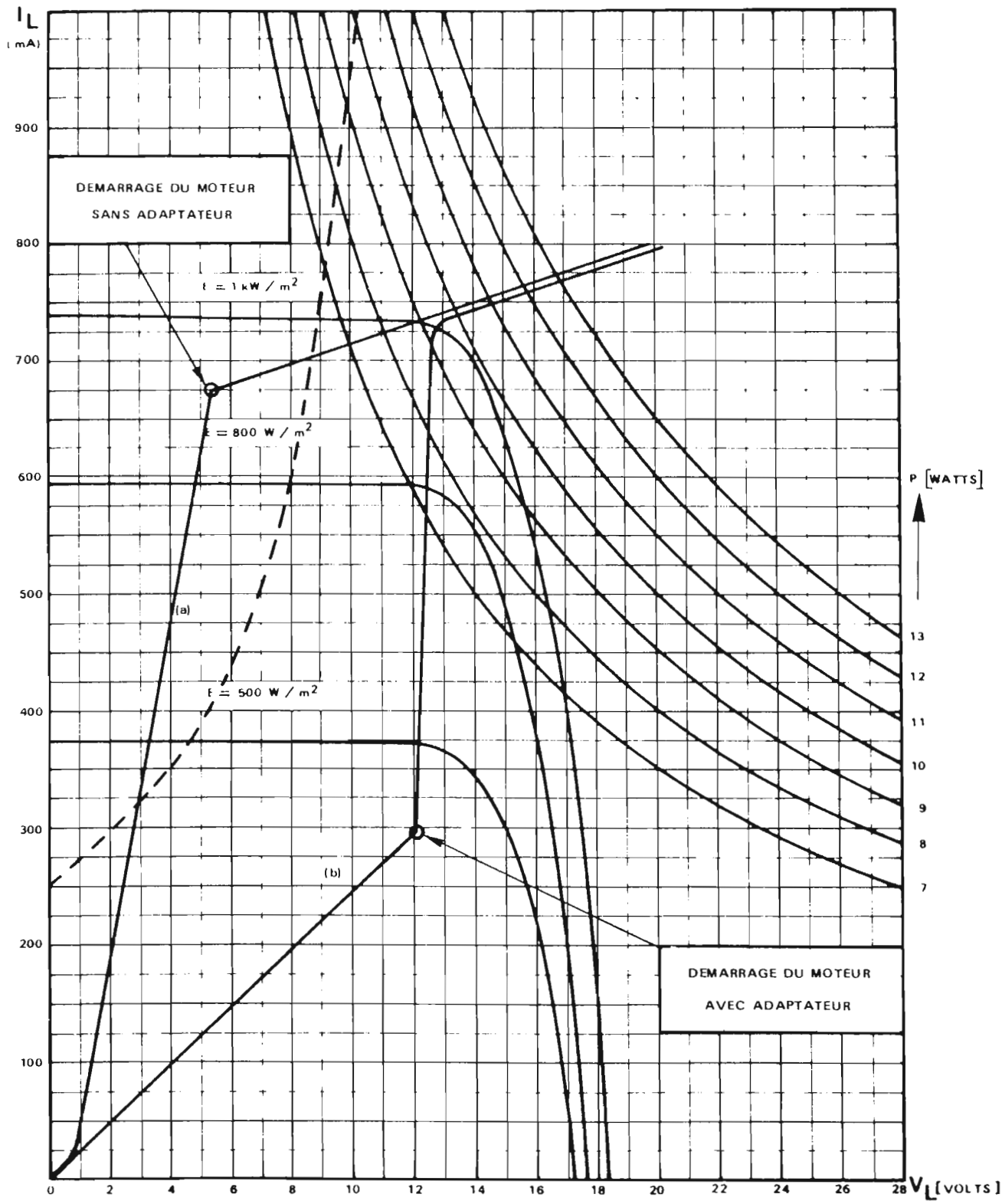

I_L (mA)
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
26
28
V_L [VOLTS]
P [WATTS]
13
12
11
10
9
8
7
DEMARRAGE DU MOTEUR
SANS ADAPTATEUR
E = 1 kW / m²
E = 800 W / m²
E = 500 W / m²
(a)
(b)
DEMARRAGE DU MOTEUR
AVEC ADAPTATEUR

FIGURE 12

II.7 ASSOCIATION MODULE ET MOTEUR

Pour de nombreuses applications, la connexion directe d'un moteur sur photopile peut être envisagé.

Tant que le moteur ne tourne pas la charge de la photopile est un court-circuit.

Dès que l'éclairement procure un courant suffisant pour dépasser le couple de démarrage, la rotation du moteur provoque une force électromotrice croissante jusqu'à l'équilibre entre la puissance reçue et la puissance fournie, compte tenu des rendements des différents organes

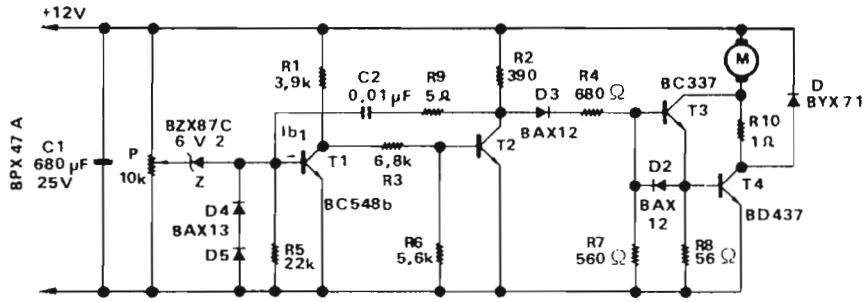


FIGURE 13 - Circuit adaptateur pour moteur 10 W

Le point de fonctionnement, du démarrage jusqu'au palier, décrit la trajectoire (a) dessinée figure 12. Pour obtenir le démarrage du moteur sous un éclairement réduit, le circuit figure 13 peut être utilisé. Cet adaptateur utilise au mieux la puissance disponible sur le module pour toutes vitesses et charges du moteur.

La trajectoire du point de fonctionnement décrit alors la courbe (b) figure 12.

NOMENCLATURE DES COMPOSANTS

REPERES	DESIGNATIONS	REFERENCES	FOURNISSEURS
T_1	Transistor silicium NPN	BC 548 b	R.T.C.
T_2	NPN	BC 548 b	«
T_3	NPN	BC 337	«
T_4	NPN	BD 437	«
D_1	Diode silicium	BYX 71	«
D_2	«	BAX 12	«
D_3	«	BAX 12	«
D_4	«	BAX 13	«
D_5	«	BAX 13	«
Z	Diode Zener	BZX 87 C 6V2	«
C_1	Condensateur électrochimique 680 µF - 25 V	2211 189 06 681	«
C_2	Condensateur plastique métallisé - sorties radiales 10 nF - 250 V	2222 344 41 103	«
R_1	Résistance à couche de carbone ½ W	CR 37/3 k 9	«
R_3	«	CR 37/6 k 8	«
R_2	«	CR 37/390 E	«
R_4	«	CR 37/680 E	«
R_5	«	CR 37/22 K	«
R_6	«	CR 37/5 k 6	«
R_7	«	CR 37/560 E	«
R_8	«	CR 37/56 E	«
R_9	«	2 X CR 37/10 E	«
R_{10}	Résistance bobinée 40 W	RB 6/1 Ω	M. Baringolz
P	Potentiomètre ajustable 10 K	2322 410 05 007	R.T.C.

II.8 RECOMMANDATIONS DE MONTAGE

Pour obtenir la meilleure longévite et espacer les visites de maintenance, il est conseillé de tenir compte de quelques règles simples :

a) Le montage doit être effectue de façon que le module soit ventilé en air libre à la température ambiante Une distance de 3 cm entre modules facilitera l'évacuation de l'air chauffé par le dos du module.

b) Tous les modules connectes en serie ou en parallèle doivent être placés sur un même plan ou sur des surfaces se présentant sous le même angle de site et d'azimut

c) Les structures supportant les modules doivent posséder des pieds de hauteur suffisante pour que la végétation ou le sable n'atteignent pas la surface utile.

d) Les connexions de sortie seront isolées dans une graisse, compound ou surmoulage pour éviter les lignes de fuites qu'occasionneraient l'humidité, la condensation, etc..

e) Prévoir le nettoyage par la pluie et utiliser un grillage ou filet si l'on craint des jets de pierres (une planche de plexiglas n'est pas recommandée)

f) Ne pas oublier que l'électrolyte d'une batterie s'évapore d'autant plus que la température est élevée et la surcharge importante. Il est donc conseillé, sous les climats tropicaux, d'enterrer la batterie et d'y adjoindre un limiteur d'intensité le cas échéant (voir § III.3).

g) Eviter de plier le surmoulage en caoutchouc de sortie de câble du module

III - GENERATEURS SOLAIRES AVEC BATTERIES

Les puissances mises en œuvre dans les installations photovoltaïques nécessitent souvent le groupement de plusieurs modules. La tension utilisée sera de préférence, un multiple de 12 V et le nombre de modules associés sera obligatoirement un multiple du précédent rapport.

III.1 ESTIMATION DU NOMBRE DE MODULE

L'utilisateur de modules solaires doit connaître le nombre de modules suffisants pour assurer l'autonomie d'une station en un lieu donné.

Le calcul se fait à partir des données météorologiques du lieu où la station est installée.

Ces données peuvent être de 2 types. On retient :

- soit les nombres d'heures d'ensoleillement,
- soit l'irradiation qui s'exprime en kJ/cm²/an.

Il est à remarquer que les relevés d'insolation connus à ce jour font apparaître des résultats plus complets pour les durées d'insolation que pour les relevés énergétiques. En effet, les relevés des nombres d'heures d'ensoleillement portent dans certains cas sur une quinzaine d'années.

Il est certain que pour les applications photovoltaïques, l'idéal serait de connaître la productivité réelle sur le site d'un module étalon incliné à la latitude du lieu et donnant des résultats d'Ampères/heures par mois. Ces relevés pourront être correlés avec les données météorologiques durant la même période.

a) Puissance délivrée par un module BPX 47 A en fonction de la durée d'insolation

En comptant toutes les heures d'insolation à 1 kW/m² et le complément pour aller à 4380 h à 0,1 kW/m² et en attribuant au diffus le même rendement de conversion, nous obtenons une puissance théorique disnible sur module BPX 47 A incliné à la latitude du lieu.

$$P_t = \frac{H \times 9{,}7 + (4380 - H)\ 1{,}1}{8760} \times 0{,}637 \times 0{,}96$$

$$P_t = \frac{H + 560}{1668}$$ avec H nombre total d'heures d'ensoleillement

Ceci avec l'hypothèse que sous 1 kW/m² les cellules atteignent 60 °C, alors que sous 0,1 kW², elles restent à 25 °C.

Le coefficient $0{,}637 = \frac{2}{\pi}$ tient compte de l'élévation du soleil de 15° par heure.

Le coefficient 0,96 corrige la perte d'énergie due à la déclinaison solaire (± 23° 27').

Il faut, d'autre part, tenir compte des pertes qui sont dues :

- à l'incertitude météorologique	± 10 %	→	k = 0,9
- aux heures où le soleil est derrière le module	5 %	→	k = 0,96
- à la modulation du spectre solaire et à l'influence de la masse d'air	5 %	→	k 0,95
- à la présence du rayonnement diffus moins favorable que le rayonnement direct	– 5 %	→	k = 0,95
- à la dispersion des caractéristiques sur les modules	10 %	→	k = 0,90
- aux pertes dans les connexions, diodes, appareillage de contrôle	5 % en 12 V 3 % en 24 V 1,5 % en 48 V	→	k = 0,97

- à la désadaptation des modules provoquée par les variations de température et l'évolution des tensions de batterie entre 22 et 27 volts — 5 % → k = 0,94
- rendement de la batterie et auto décharge (cas de la charge fonctionnant 24 h /24). — 15 % → k = 0,85

La puissance utile devient $P_u = P_t \cdot 0{,}633 \cdot 0{,}85$

$$\boxed{P_u = \frac{H + 560}{3100}}$$

Il est certain que la prise en compte des cœfficients devra être adapté à chaque calcul de station, et suivant les types d'application.

b) Puissance délivrée par un module BPX 47 A en fonction de l'énergie globale au sol.

Hors atmosphère à l'équateur, l'énergie moyenne reçus est estimée à 870 Cal/cm²/jour (A.F.E.D.E.S. cahier N 1 page 17), soit 3.635 J/cm²/jour. Par ciel clair et parfaitement pur, l'énergie au sol est égale à $\frac{870}{1{,}4} = 2.596$ J/cm²/jour.

Soit 0,721 Wh/cm²/jour.

La surface utile pour un module BPX 47 A est de 860 cm².

L'énergie qu'il intercepte est donc 860 × 0,721 = 620 Wh/jour.

ou $\frac{620}{24} = 25{,}8$ Watts moyens sur l'année.

En admettant un rendement photovoltaïque (à 60 °C) de 11,2 % $P_{to} = 25{,}8 \times 0{,}112 = 2{,}88$ W.

Pour un module incliné sur l'horizontal d'un angle i et en supposant que l'énergie mesurée E ne contient pas de rayonnement diffus, la puissance théorique d'un module est :

$$P_t \# \frac{E\ cal/cm^2/jour \times 2{,}88}{621} \times \frac{\cos(i - lat + V)}{\cos(lat + V)}$$

V étant la déclinaison solaire pour, le mois, la décade ou le jour considéré.

En tenant compte de $k_1 = 0{,}633$ et $k_2 = 0{,}85$, cœfficients qui seront à adapter suivant chaque cas :

$$P_u = \frac{E\ cal/cm^2/jour \times 2{,}88 \times 0{,}538}{621}$$

$$\boxed{P_u = \frac{E\ cal/cm^2/jour}{400} \times \frac{\cos(i - lat + V)}{\cos(lat + V)}} \quad Watts$$

Ces relations sont valables pour une orientation des modules face au sud avec une inclinaison sur l'horizontale correspondant à la latitude du lieu.

Dans le chapitre suivant, des orientations différentes seront envisagées.

III.2 RELATION ENTRE SURFACE DES PHOTOPILES ET CAPACITE DES BATTERIES

Le calcul de la capacité de la batterie est mené en totalisant mois par mois l'excès ou le défaut des Ah produit par des modules inclinés suivant la latitude du lieu.

Ce calcul est fait en supposant que la surface des photopiles était juste suffisante pour fournir l'énergie demandée à partir de l'ensoleillement moyen annuel.

Si cette méthode est entièrement valable lorsque l'on possède les résultats d'ensoleillement mois par mois, elle ne permet pas pour autant de calculer les batteries lorsque l'on ne dispose que des informations données sur les cartes d'ensoleillement de janvier, juillet et annuelles.

D'autre part, la diminution du prix des photopiles et l'augmentation du coût des batteries d'accumulateur modifient l'esprit même de la conception des stations pour lesquelles la recherche d'une surface minimale de photopile n'est plus l'objectif principal.

RELATION FONDAMENTALE

Une approche du calcul de la capacité de la batterie peut être donnée par la formule

$$C = \frac{C_T}{\pi} \times \frac{\Delta H_m}{H_m}$$

ou

C = Capacité réelle en Ah à installer, compte tenu du débit moyen demandé,

C_T = Capacité théorique qui serait nécessaire s'il n'y avait pas de photopiles pour assurer l'autonomie de la station sur un an

$$C_T = \frac{P}{U} \times 8760 \text{ en Ah}$$

H_m = Heures d'ensoleillement moyen mensuel.

ΔH_m = $\frac{(H_m max - H_m min) \times 0,92}{2}$ $H_m$max étant le nombre d'heures d'ensoleillement du mois le plus favorable et $H_m$min celui du mois le plus sombre de l'année

L'inclinaison de la structure supportant les modules est égale à la latitude du lieu. Le cœfficient 0,92 tient compte de la déclinaison aux solstices.

Noter que la capacité réelle d'une batterie dépend de son courant de décharge. Celui-ci étant généralement très faible devant $\frac{C}{10}$, dans une station solaire, la capacité réelle disponible est souvent plus élevée que la nominale.

Toutefois, en raison des pertes par autodécharge, de l'ordre de 3 % par mois pour les types au plomb doux et du fait de la limitation à 2,3 V de la charge d'un élément, il est prudent de prévoir une capacité de 20 % supérieure à la capacité nécessaire.

Cette relation est établie en prenant pour hypothèse que la variation des heures d'insolation mensuelle sur l'année, est d'allure sinusoïdale (figure 14) autour de la valeur moyenne H_m.

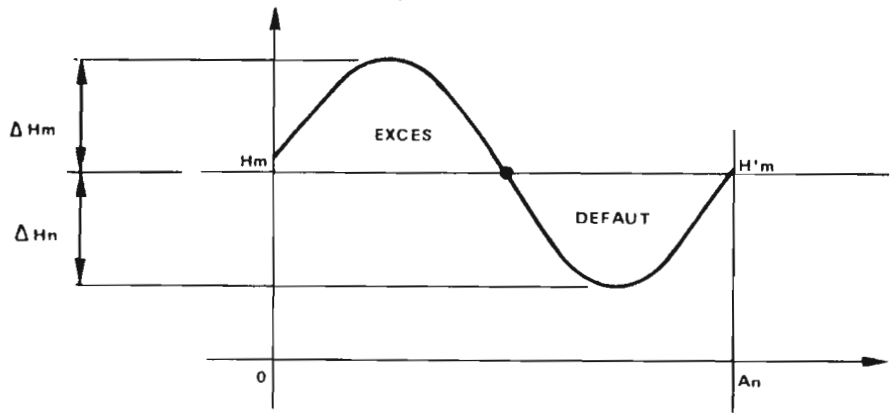


FIGURE 14

Les Ah produits par les photopiles suivront les ordonnées de cette courbe.

La surface 0, H_m, H'_m, A_n représente la capacité théorique C_T que demande la station sur l'année et que fournit la photopile, (en ampère-heure).

$$1 \cdot C_T = H_m \times A_n \iff \frac{P}{U} \times 8760$$

Les A_h en excès, étant égaux aux Ah en défauts, sont représentés par la surface de chaque demi-sinusoïde.

La capacité nécessaire, pour restituer l'hiver l'énergie reçue en excès l'été, est donc :

$$2 \cdot C = \frac{2\,\Delta H_m}{\pi} \times \frac{A_n}{2}$$

de la relation (1) il vient $A_n = \frac{C_T}{H_m}$ et par substitution dans (2) :

$$\boxed{C = \frac{C_T}{\pi} \times \frac{\Delta H_m}{H_m}}$$

Si l'on préfère exprimer la capacité de la batterie en watt-heure, il vient :

$$C_{Wh} = \frac{24P \times 365}{\pi} \quad \frac{\Delta H_m}{H_m}$$

$$\boxed{C_{Wh} \# 2790\,P \cdot \frac{\Delta H_m}{H_m}}$$

III.2.1 Réduction de la capacité des batteries

Afin de réduire le poids et le prix des équipements, on souhaite diminuer la capacité des accumulateurs et pour se faire on dispose de 2 méthodes.

a) Augmentation de surface des photopiles

Tout en conservant l'inclinaison égale à la latitude du lieu, si l'on augmente de a % le nombre des modules, la représentation de la figure 14 se transpose en la figure 15.

La capacité de la batterie se trouve alors réduite à la surface hachurée.

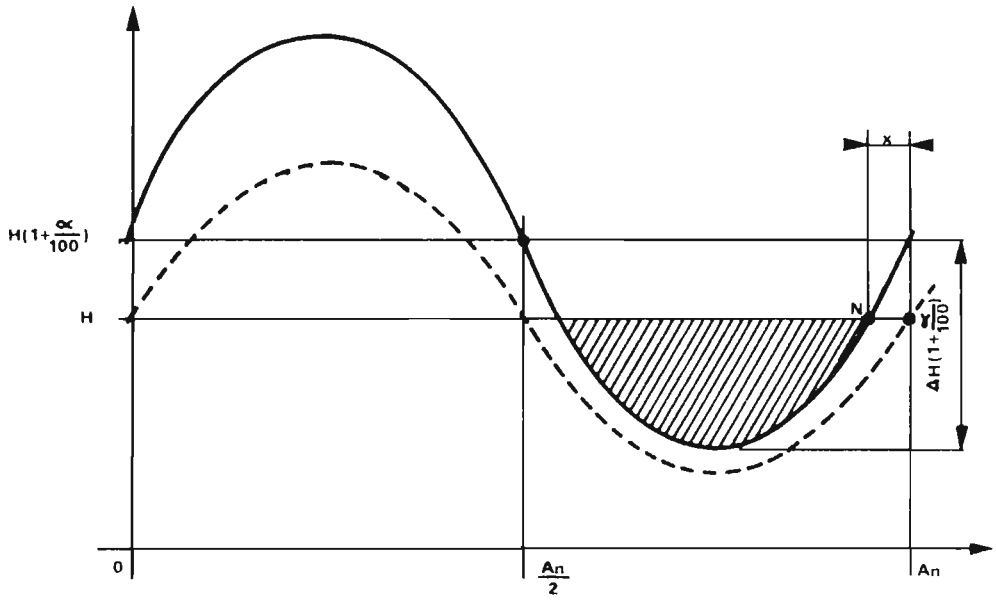


FIGURE 15

Opérons un changement d'axe et appelons x l'abscisse du point N (figure 16).

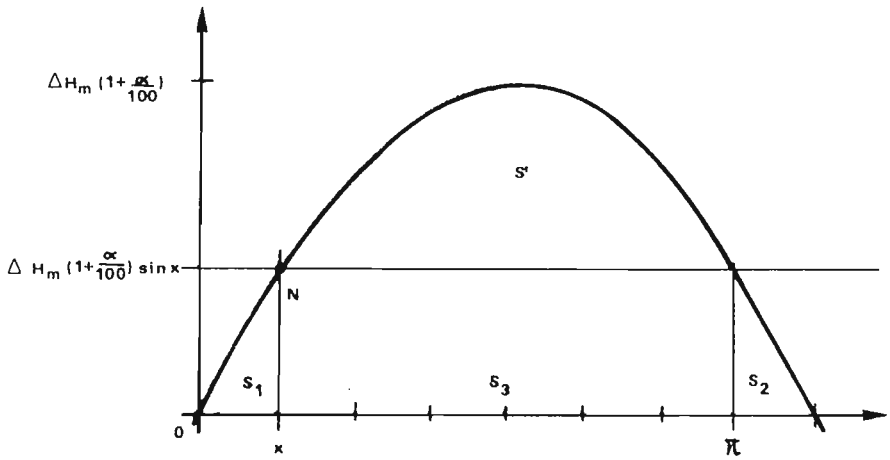


FIGURE 16

Pour une sinusoïde d'amplitude 1, la primitive de la fonction

$$y = \sin x \qquad \text{est} \qquad A(x) = -\cos x$$

$$S_1 + S_2 + S_3 = 2 - 2\cos x + (\pi - 2x)\sin x$$

la surface

$$S' = 2 \cdot (S_1 + S_2 + S_3)$$
$$= 2\cos x - (\pi - 2x)\sin x$$

Pour une sinusoïde d'amplitude $\Delta H_m\,(1 + \frac{\alpha}{100})$

$$S' = \Delta H_m \left[2\cos x - (\pi - 2x)\sin x \right] (1 + \frac{\alpha}{100})$$

Lorsque les photopiles sont calculées au plus juste, la surface correspondant à la capacité normale de batterie est : $S = 2.\Delta H_m$

le cœfficient de réduction relatif à une augmentation α % de photopile est donc :

$$k = \frac{S'}{S} = \left[\cos x - (\frac{\pi - 2x}{2}) \sin x \right] (1 + \frac{\alpha}{100})$$

D'autre part :

$$\Delta H_m (1 + \frac{\alpha}{100}) \sin x = \frac{\alpha}{100} H_m$$

d'où :

$$\sin x = \frac{\alpha}{100 + \alpha} \cdot \frac{H_m}{\Delta H_m}$$

Nous pouvons donc, en prenant α % en paramètre, tracer les courbes de k en fonction de $\frac{\Delta H_m}{H_m}$.

Les calculs effectués permettent d'établir la figure 17.

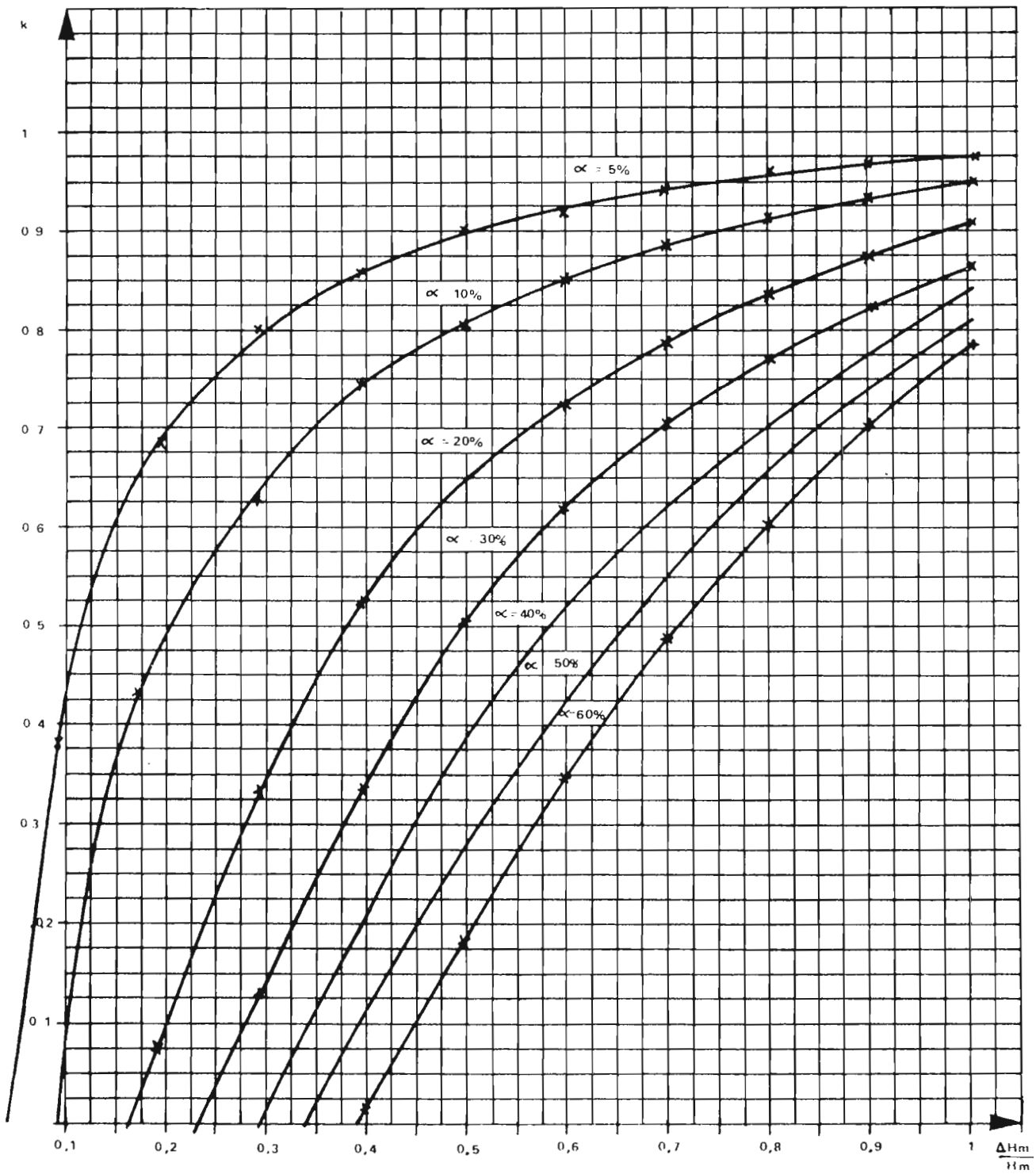


FIGURE 17

b) Inclinaison forcée de la structure des photopiles

Cette méthode consiste à réduire les écarts de production d'énergie entre l'hiver et l'été en inclinant davantage la photopile pour obtenir une incidence plus favorable l'hiver.

L'intérêt de cette procédure réside non seulement dans la diminution de la capacité des batteries, mais également dans une réduction de l'encrassement.

En contrepartie, l'énergie moyenne convertie étant plus faible que sous l'inclinaison égale à la latitude du lieu, une augmentation du nombre de module doit être envisagée.

De plus, par un accroissement supplémentaire de modules, la précédente méthode peut coopérer avec celle-ci.

RAPPEL :

L'inclinaison de l'axe des pôles de 23° 27' par rapport à la normale au plan de la trajectoire de la planète, provoque durant l'année (lorsque les modules sont inclinés par rapport à l'horizontal d'un angle correspondant à la latitude du lieu), une modulation du rendement de conversion des photopiles, suivant une évolution d'allure sinusoïdale de périodicité 6 mois et d'amplitude crête-à-crête de l'ordre de 8,3 %, nécessitent un accroissement de surface des photopiles de 4,15 % par rapport à ce qui serait nécessaire si l'axe des pôles était perpendiculaire au plan de l'écliptique.

En effet, cos 23° 27' = 0,917.

Toutefois, ce système a l'inconvénient de ne pas corriger la diminution notable d'énergie reçue dans l'hémisphère nord pendant les mois d'hiver et de provoquer une surcharge des batteries pendant l'été et l'inverse dans l'hémisphère sud.

Solution proposée :

Une inclinaison plus prononcée des photopiles à l'avantage comme le montre les courbes de la figure 18 de provoquer une fluctuation de périodicité annuelle favorisant la conversion en hiver et la réduisant en été.

Pour profiter au maximum des avantages de l'inclinaison forcée, nous considérons que l'angle de 23° 27' en plus de la latitude du lieu peut être retenue et ce, pour des pays au voisinage de l'équateur.

Pour des pays au-delà de 15° de latitude, nous estimons qu'il n'y a pas lieu d'incliner les panneaux de 12° en plus de la latitude du lieu (voir figure 18).

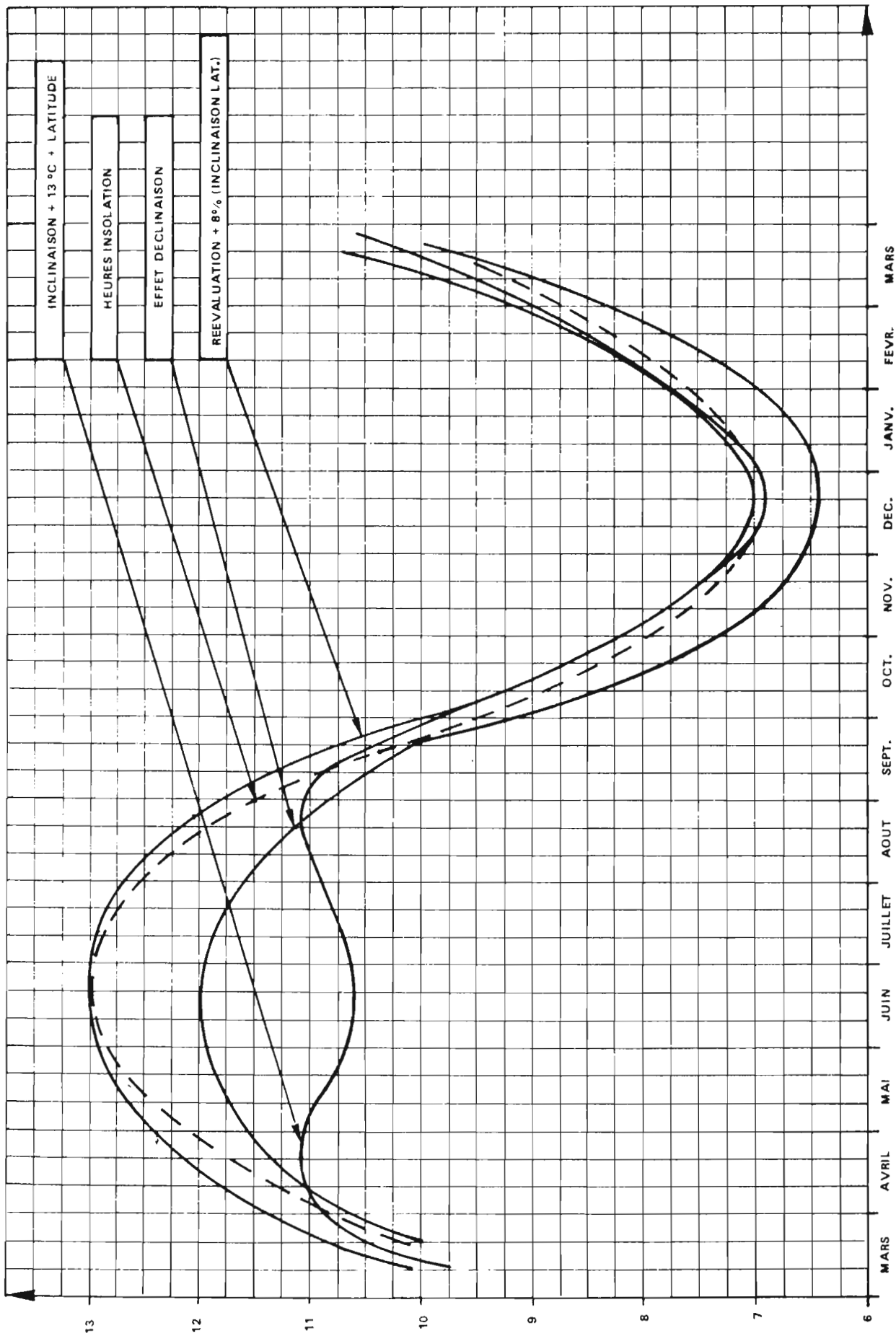

INCLINAISON + 13 °C + LATITUDE
HEURES INSOLATION
EFFET DECLINAISON
REEVALUATION + 8% (INCLINAISON LAT.)
MARS
AVRIL
MAI
JUIN
JUILLET
AOUT
SEPT.
OCT.
NOV.
DEC.
JANV.
FEVR.
MARS
13
12
11
10
9
8
7
6

FIGURE 18

III.2.2 Groupement des batteries

Les éléments au plomb doux sont disponibles en éléments de 2 V, le groupement en série se fait aisément en prenant soin d'établir des connexions, soit soudées, soit avec boulonnerie en laiton. (Toujours prévoir un fusible en série avec chaque batterie).

La capacité des éléments étant parfois limitée à 200 Ah, il est alors nécessaire de regrouper plusieurs jeux d'éléments en parallèle. Nous recommandons alors, sans que cela soit impératif, l'introduction d'une diode du type BYX 97 300 entre photopiles et chaque série de batterie et une diode BYX 42 ´300 (ou BYX 97-300) entre batteries et utilisation. (Voir figure 19).

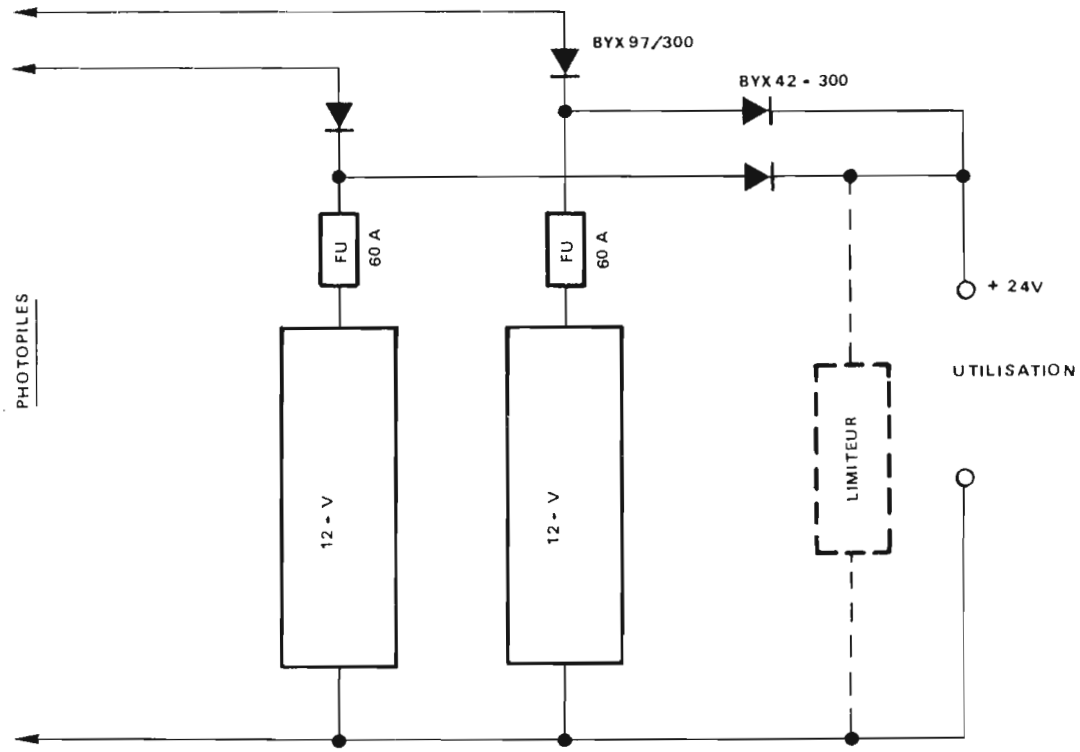


FIGURE 19

Les nouvelles diodes BYW 31-150 à faible tension directe peuvent se substituer avantageusement à la BYX 42-300.

Lorsque cela est possible, les modules seront partagés en un nombre de groupes identiques à celui des jeux de batteries en parallèle.

Recommandations :

1° - Pour réduire l'évaporation de l'électrolyte, les bacs doivent être disposés dans un endroit aussi frais que possible, avec une aération, en raison des risques d'explosion en cas de surcharge.

Deux solutions sont utilisées :

- La soute enterrée.
- Le coffre à accus en polyester armé, blanc que l'on dispose à l'ombre des panneaux.

Le modèle standard est conçu pour recevoir 36 bacs de 200 Ah.

2° - La mise en service d'une station d'énergie autonome peut se faire à l'équinoxe de printemps avec une batterie pratiquement déchargée.

Par contre, vers l'équinoxe d'automne, la charge doit être totale, (hémisphère nord).

En pratique les éléments sont livrés chargés secs avec électrolyte séparé.

III.3 ROLE DU LIMITEUR D'INTENSITE

La surcharge des batteries provoque l'électrolyse du liquide qui se manifeste par un dégazage et une perte d'eau. Elle entraîne un vieillissement prématuré de l'élément et une périodicité de maintenance plus brève.

Avec les batteries au plomb doux, la tension de fin de charge idéale est comprise entre 2,25 et 2,3 volts par élément avec une dérive thermique de -3 mV/°C.

Un limiteur d'intensité est d'autant plus nécessaire, que la capacité de batterie est faible pour un ensoleillement local important.

On choisira de préférence un limiteur simple (fiabilité élevée), dont la présence perturbe au minimum l'installation tant que la batterie n'a pas atteint la tension de fin de charge.

III.3.1 Limiteur de charge pour 1 module BPX 47 A

a) Principe

Le limiteur se connecte entre le module et la batterie suivant la figure 20. Lorsque la batterie est chargée, c'est le limiteur qui sert de charge au module BPX 47 A, ce qui évite à la batterie d'être surchargée et à son liquide de s'évaporer.

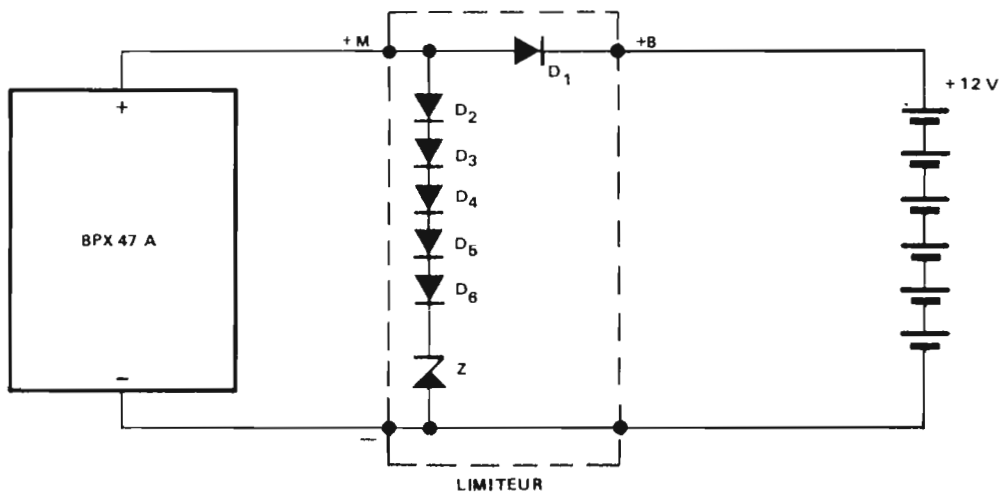


FIGURE 20

b) Fonctionnement

Le limiteur est composé de :

1 diode Zener BZY 91-C11
6 diodes BZY 42-300R

assemblés suivant la figure 20

La diode D_1 sert de diode anti-retour pour la batterie.

Les diodes D_2 à D_6 ont pour but de compenser la dispersion sur les tensions Zener des BZY 91-C11 données à ± 5 % et elles permettent de retablir la dérive thermique de la diode Zener.

Courbes courant-tension du limiteur (voir figure 21).

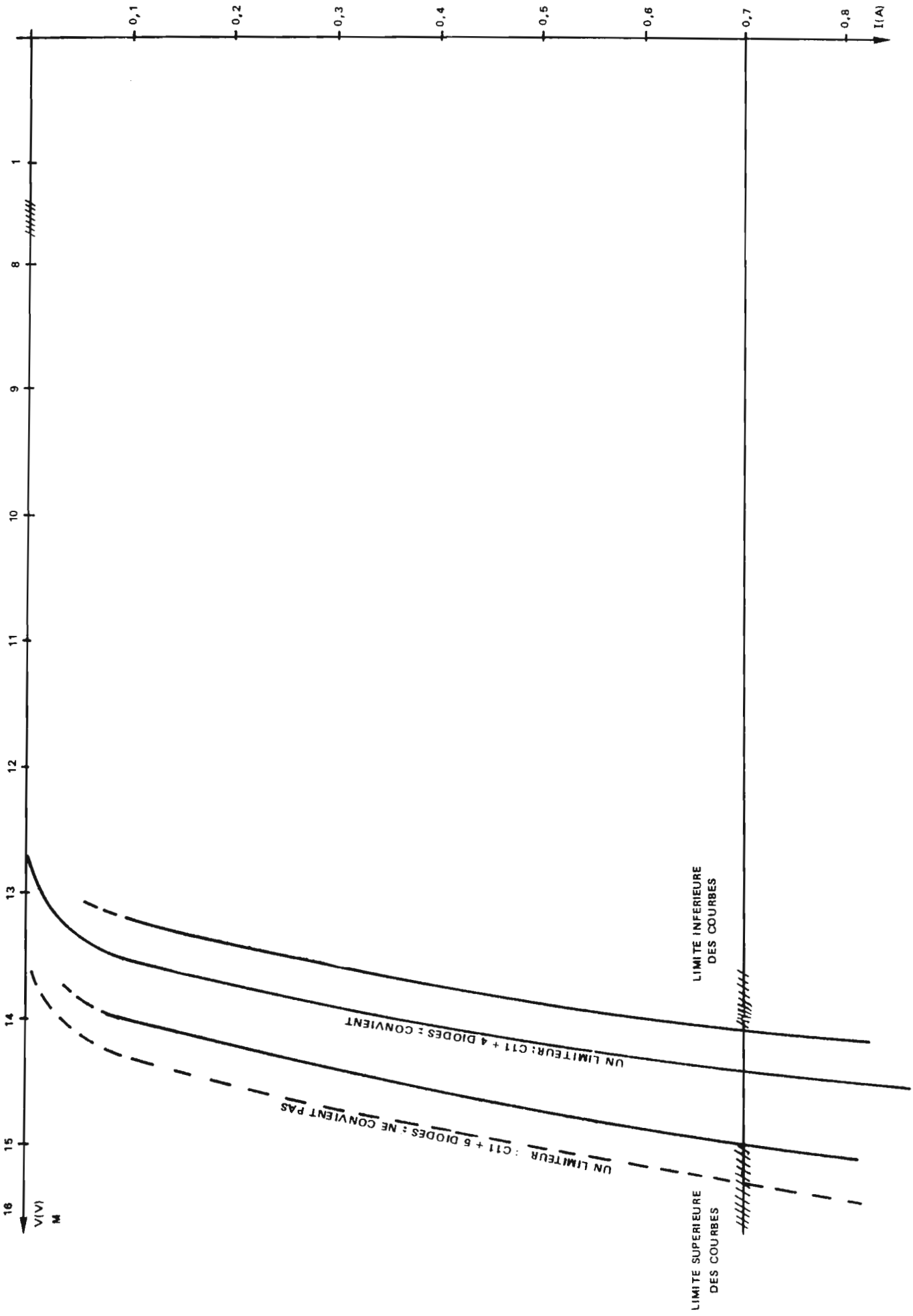

0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
I(A)
1
8
9
10
11
12
13
14
15
16
V(V)
M
LIMITE INFERIEURE DES COURBES
UN LIMITEUR: C11 + 4 DIODES : CONVIENT
UN LIMITEUR : C11 + 5 DIODES : NE CONVIENT PAS
LIMITE SUPERIEURE DES COURBES

FIGURE 21

c) Réglage du limiteur

Pour un courant fixe donné par le panneau sur le limiteur seul, le point de fonctionnement du limiteur doit se situer entre les 2 courbes limites données figure 21.

Par exemple :

Pour I = 0,7 A, la tension du limiteur devra être comprise entre 14,1 et 15 V.
cette tension étant réglable en court-circuitant 0, 1 ou 2 diodes.

les BZY 91-C11 ont une tension inverse comprise entre 10,4 V et 11,6 V pour un courant inverse de 2 A, soit pour 0,5 A une tension comprise entre 9,9 et 11,2 V.

Si V_{inv} (tension inverse pour I = 0,5 A) est comprise entre 9,9 et 10,5 V, il faut 5 diodes en série
Si V_{inv} (« « « «) est comprise entre 10,5 et 11,2 V, il faut 4 diodes en série.

Si on peut choisir les BZY 91-C11 par leur tension à ± 2 %, soit pour V_{inv} comprise entre 10,5 V et 11 V (I = 0,5 A), il suffira alors de 4 diodes en série dans tous les cas.

NOMENCLATURE LIMITEUR

REPERES	DESIGNATIONS	REFERENCES	FOURNISSEURS
D_1	Diodes silicium	BYX 42 - 300R	RTC
D_2	«	«	«
D_3	«	«	«
D_4	«	«	«
D_5	«	«	«
D_6	«	«	«
Z	Diode Zener	BZY 91 - C11	«
R	Radiateur	Lessel profil F - Longueur 10 cm	LESSEL
E_1	Entretoises	Longueur : 30 mm - SCH hexagonale : 5 mm - taraudée M3	SODISTREL
E_2	«	«	«
E_3	«	«	«
	6 vis laiton	ϕ 3,2	
	4 cosses mâles	1606 50 - 2	AMP
	4 cosses femelles	41 729 - 2	AMP

III.3.2 Limiteurs pour 2 à 12 modules

Pour des équipements jusqu'à 12 modules BPX 47 A, un limiteur simple peut être utilisé suivant figure 23.

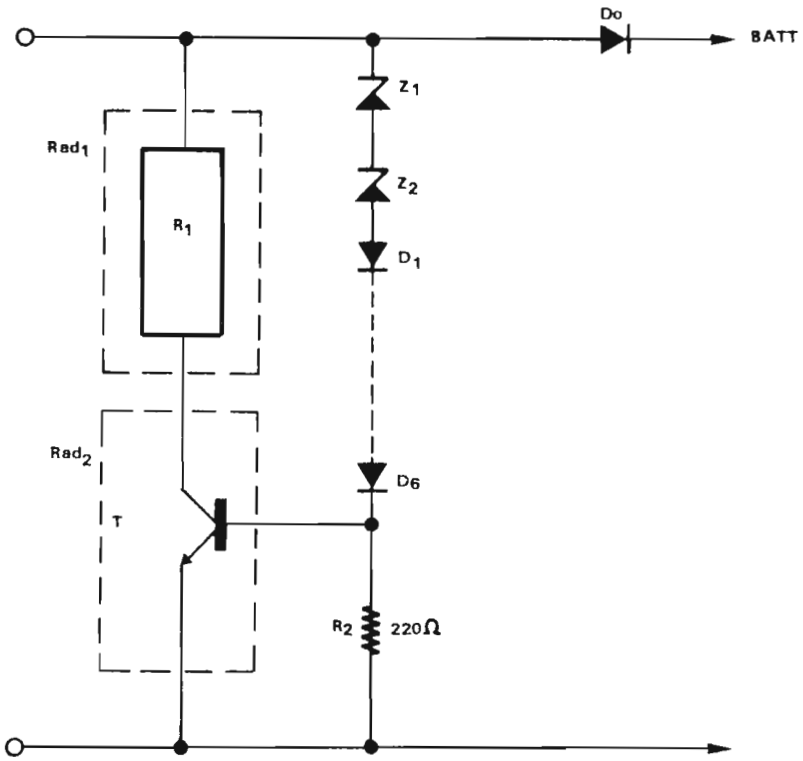


FIGURE 23

Un transistor de puissance est rendu conducteur lorsque les Zeners et les diodes montées en série débitent.

La résistance de collecteur R_1 constitue progressivement une charge pour la photopile et réduit la dissipation du transistor de puissance, elle est montée sur un radiateur (rad_1) de même dimension que celui destiné au transistor (rad_2).

Réglage :

Le réglage de mise en conduction du transistor s'effectue sous la tension fin de charge désirée en shuntant entre 1 et 6 diodes (D_1..... D_6) dont les tensions directes comprennent les dispersions sur les tensions de Zener et partiellement les dérives thermiques des Zeners.

NOMENCLATURE DES LIMITEURS

NOMBRE MODULES Volts	2 24 V	3 36 V	4 12 V	4 24 V	4 48 V	6 24 V	6 36 V	12 48 V
T	2 N 3055 ou BDY 93	2 N 3055	2 N 3771 ou BDX 67	2 N 3055	2 N 3055	2 N 3771	2 N 3055	2 N 3771
Rad_1 profil U Lessel	12 cm	12 cm	12 cm	12 cm	12 cm	17 cm	17 cm	23 cm
Rad_2	12 cm	12 cm	12 cm	12 cm	12 cm	17 cm	17 cm	23 cm
R_1 (sfernice)	1.RH 50.27 Ω	1.RH50.36 Ω	2.RH50.6 Ω	2.RH50.27Ω	2.RH50.100 Ω	3.RH 50.27 Ω	3.RH50.56Ω	4.RH50.68Ω
Z_1	BZY 93/C 27	BZY 93/C 39	BZY 93/C 13	BZY 93/C 27	BZY 93/C 27	BZY 93/C 27	BZY 93/C 39	BZY 93/C 27
Z_2	o	o	o	o	BZY 93/C 27	o	o	BZY 93/C 27
D_1 à D_6	BYX 42-300	BYX 42-300	BYX 42-300	BYX 42-300	BYX 42-300	BYX 42-300	BYX 42-300	BYX 42-300
D_0	BYX 42-300	BYX 42-300	BYX 97-300	BYX 97-300	BYX 42-300	BYX 97-300	BYX 97-300	BYX 97-300
R_2	220 Ω (5 W)	220 Ω (5 W)	220 Ω (5 W)	220 Ω (5 W)	220 Ω (5 W)	220 Ω (5 W)	220 Ω (5 W)	220 Ω (5 W)

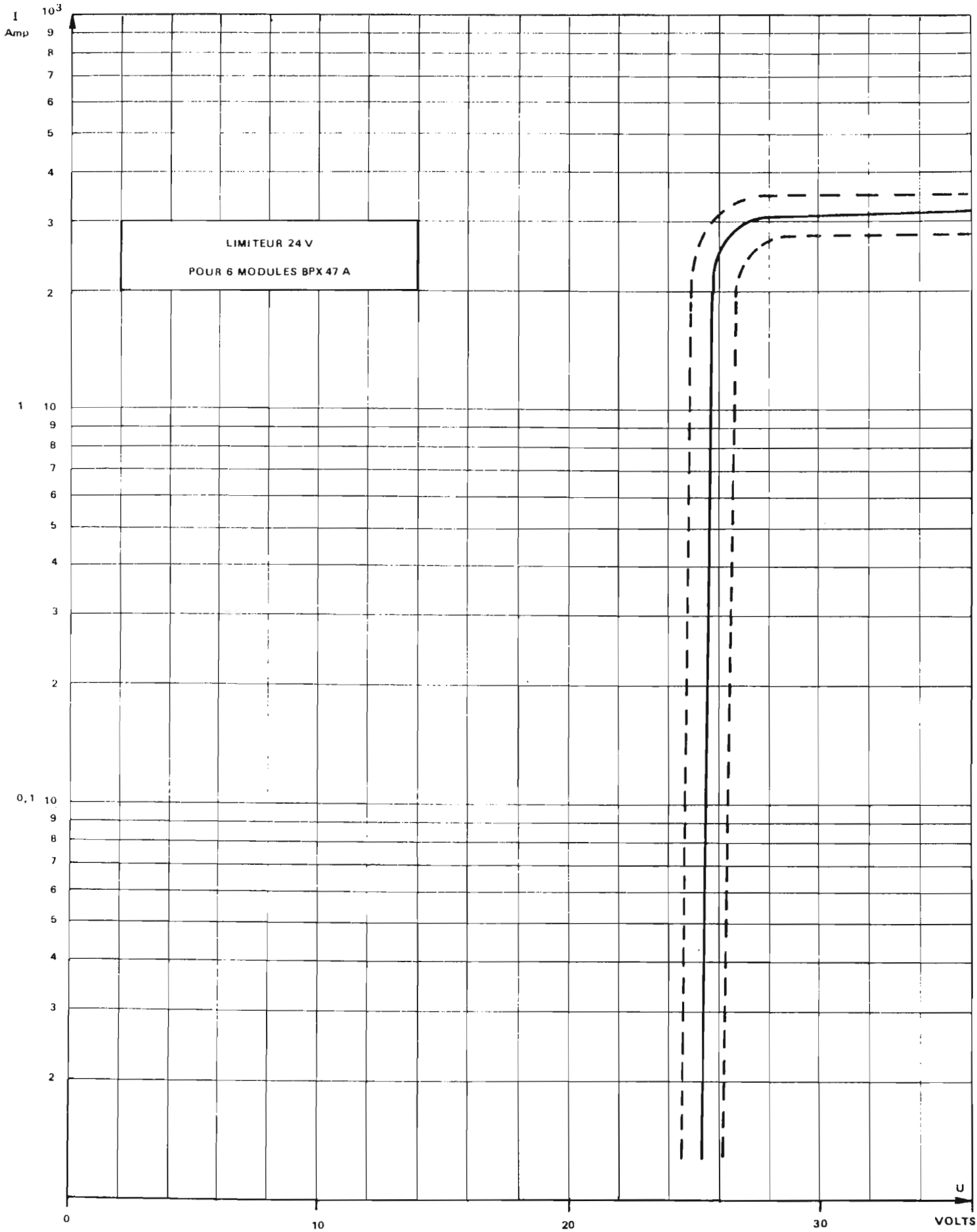


FIGURE 27 - Courbe de reponse du limiteur à 25 °C

III.4 ASSOCIATION DES MODULES « BPX 47 A »

En associant les modules par des combinaisons série et parallèle, il est possible de satisfaire une grande variété d'applications se diversifiant par leur puissance et leur tension.

III.4.1 Fixation des modules

Les modules BPX 47 A seront fixés sur des structures rigides, autant que possible orientables pour s'adapter aux différentes latitudes.

Pour des installations importantes, un sous-ensemble de 12 modules (dénommé panneau) paraît bien adapté aux combinaisons de tensions nominales des batteries :

12, 24, 36, 48, 72 et 120 volts.

Ces panneaux doivent être suffisamment robustes pour résister aux vents les plus violents se manifestant sur le site.

Le dos des modules doit être dégagé pour favoriser leur refroidissement en air libre.

Un espace de 3 cm entre chaque module est nécessaire pour l'évacuation de l'air chaud.

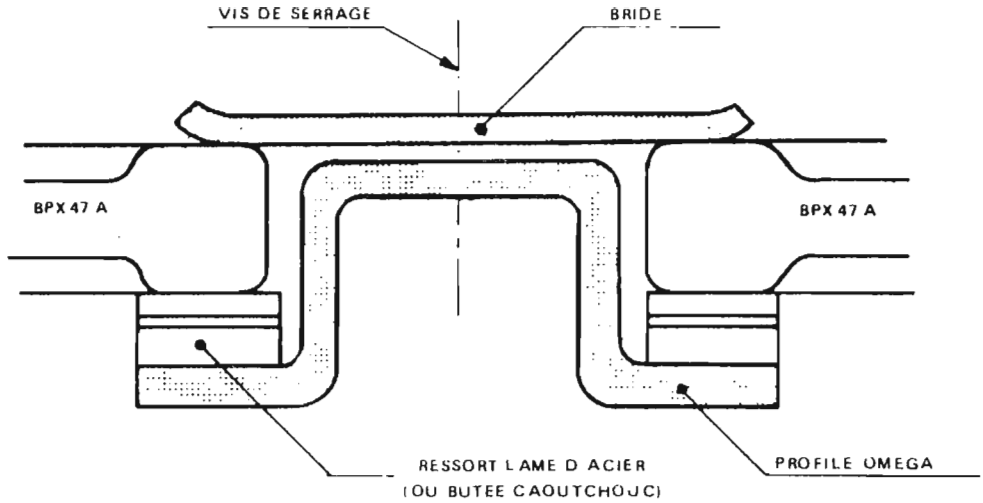
La hauteur au-dessus du sol doit être aussi élevée que possible (la végétation ou le sable pouvant en certains lieux recouvrir rapidement les panneaux).

Les cadres des modules étant en aluminium anodisé, il ne sont pas conducteurs, toutefois lors du serrage de ceux-ci sur les structures, la couche d'anodisation peut être rayée, il est donc prudent d'éviter les pièces de serrage en métal présentant des différences de potentiels électrochimiques supérieures à 300 mW.

Ainsi l'acier étamé ou cadmié, l'aluminium et le dural conviennent, mais l'acier inox doit être rejeté.

La figure 28 montre 2 styles de fixation.

Il est recommandé de fixer les modules par les côtés et non sur les angles mêmes.


VIS DE SERRAGE
BRIDE
BPX 47 A
BPX 47 A
RESSORT LAME D ACIER
(OU BUTEE CAOUTCHOUC)
PROFILE OMEGA

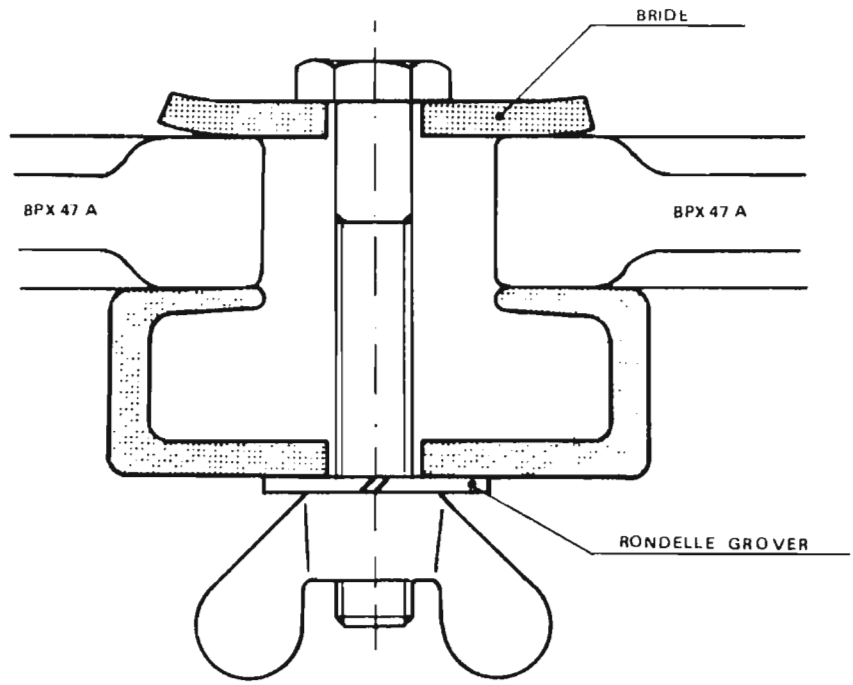

BRIDE
BPX 47 A
BPX 47 A
RONDELLE GROVER

FIGURE 28

III.4.2 Montage en série

Le § II.6 donne justification de la zone interdite pour un module BPX 47 A. Pour éviter de travailler dans celle-ci, il est conseille d'associer les modules de sorte que chacun ait à ses bornes une batterie de 12 V (voir figures 30 à 33).

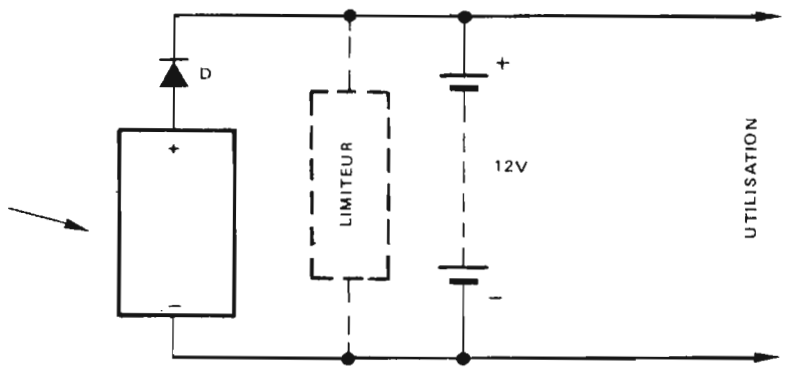


FIGURE 30
1 Module BPX 47 A avec batterie 12 V

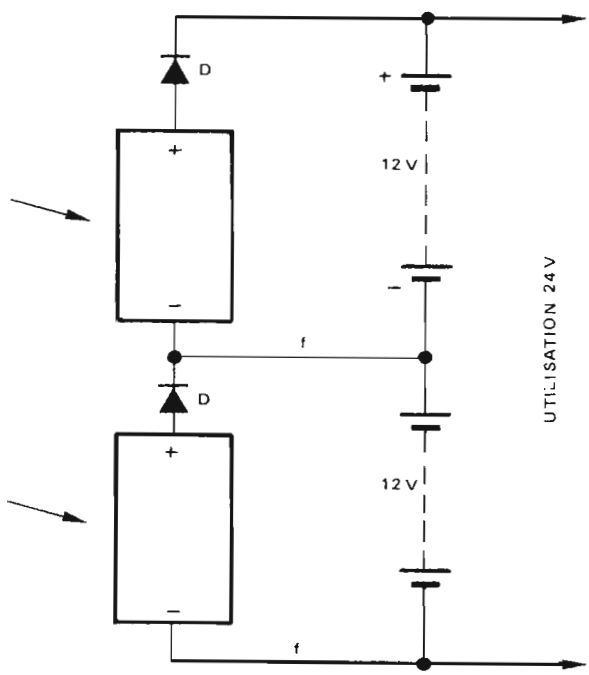


FIGURE 31
2 Modules BPX 47 A
avec batterie 24 V

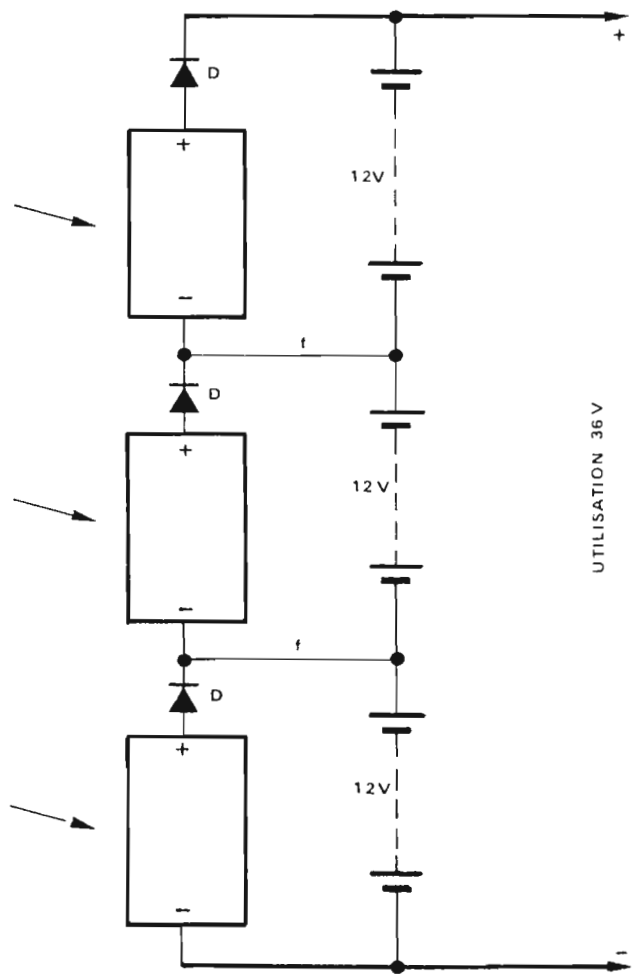


FIGURE 32
3 Modules BPX 47 A avec batterie 36 V

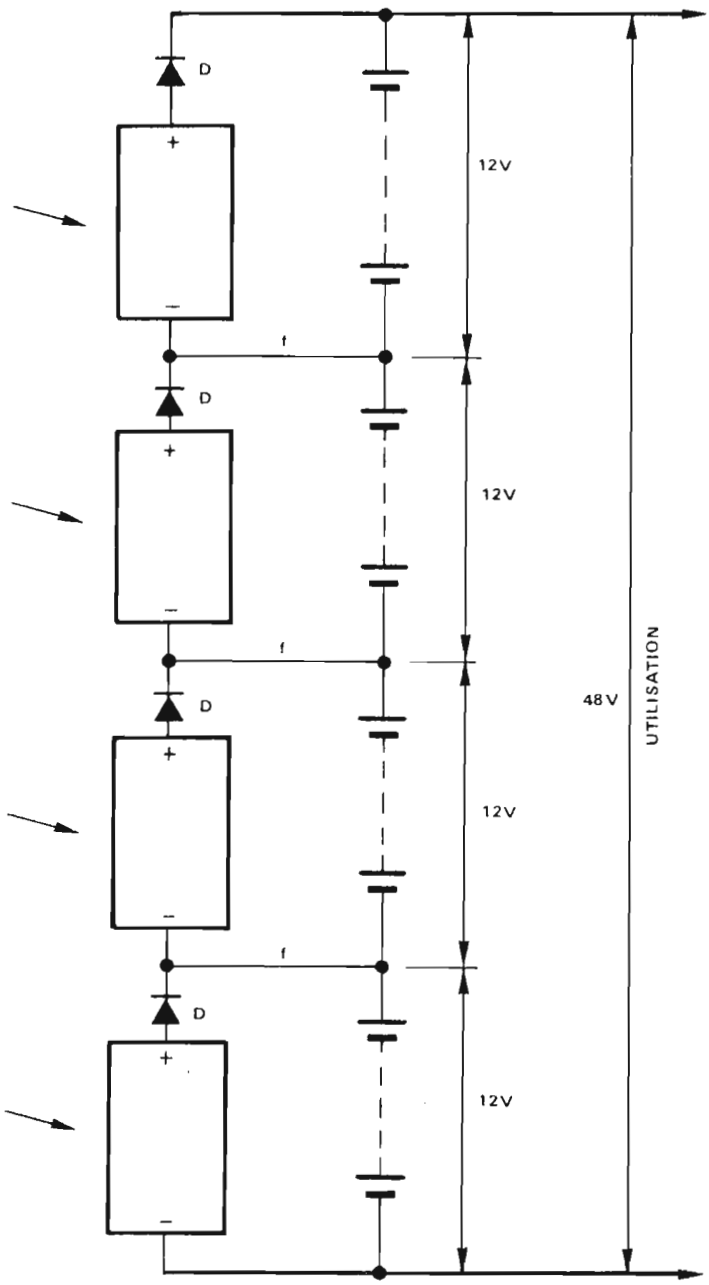


FIGURE 33

4 Modules BPX 47 A
avec batterie 48 V

D = BYX 42-300
ou
BYW 31-150

La diode D évite la décharge des accumulateurs durant la nuit dans les jonctions en direct que constituent les cellules photovoltaïques.

Un limiteur de charge peut être dispose aux bornes de chaque accumulateur 12 V ou encore sur la totalité des batteries.

III.4.3 Montage en parallèle

Si l'on effectue sans précaution particulière la mise en parallèle directe des modules, l'un d'eux ou plusieurs peuvent fonctionner en récepteur et s'échauffent.

Ceci se produit lorsque l'ensemble ne débite pas sur une charge ou lorsque l'un d'eux est masqué.

Ainsi la figure 34 montre qu'en connectant en parallèle 2 modules A et B de caractéristiques légèrement différentes, le module B travaille en récepteur.

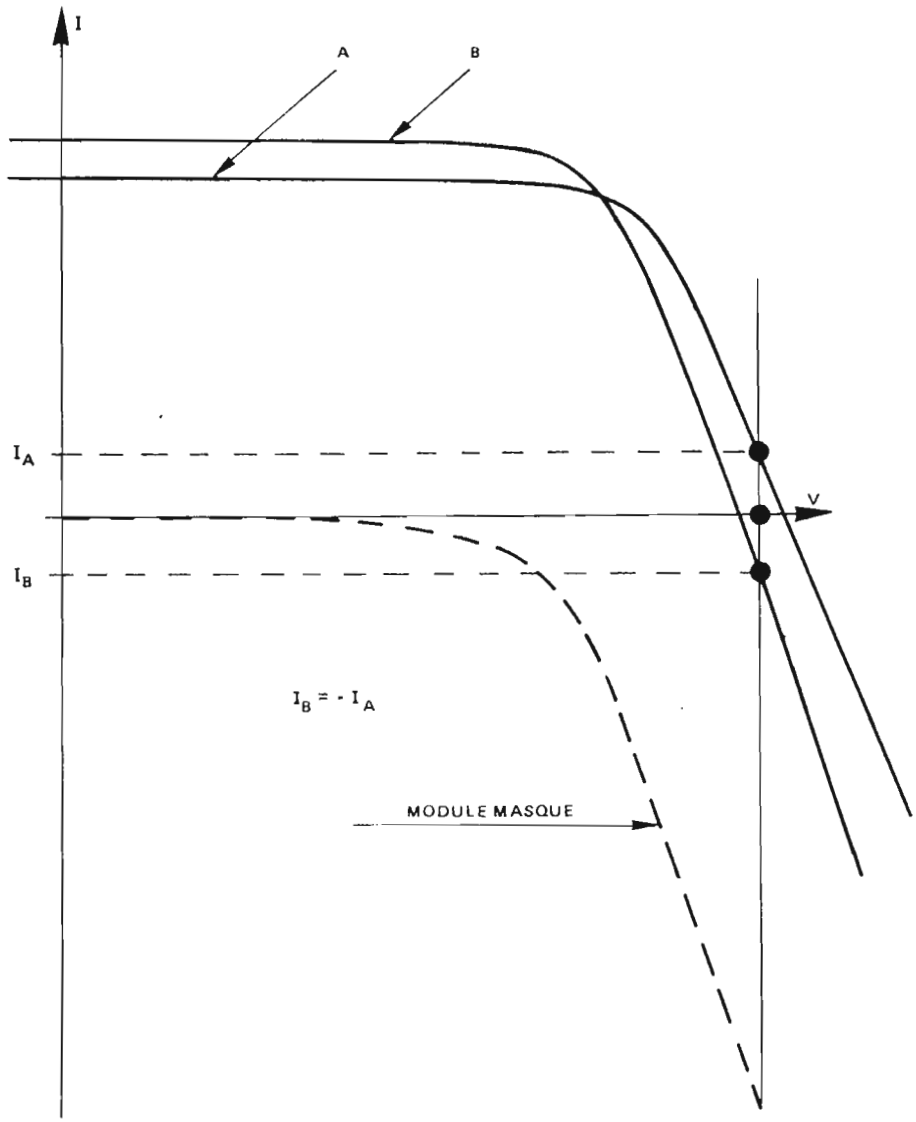


FIGURE 34

Bien que les risques soient limités, ce phenomène peut être évité en insérant une diode en série avec chaque module, (types conseillés BYX 42-300 ou BYW 31-150).

Cette procédure présente également l'avantage d'éliminer automatiquement tout module accidentellement en court-circuit (au niveau du câble de sortie par exemple).

Les montages en parallèle et série-parallèle peuvent s'effectuer suivant les figures 35 et 36.

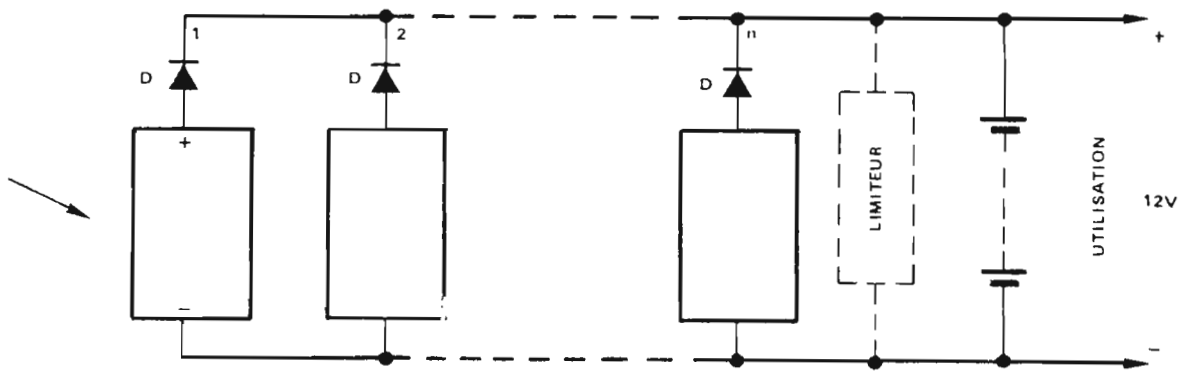


FIGURE 35 - n Modules BPX 47 A avec batterie 12 V

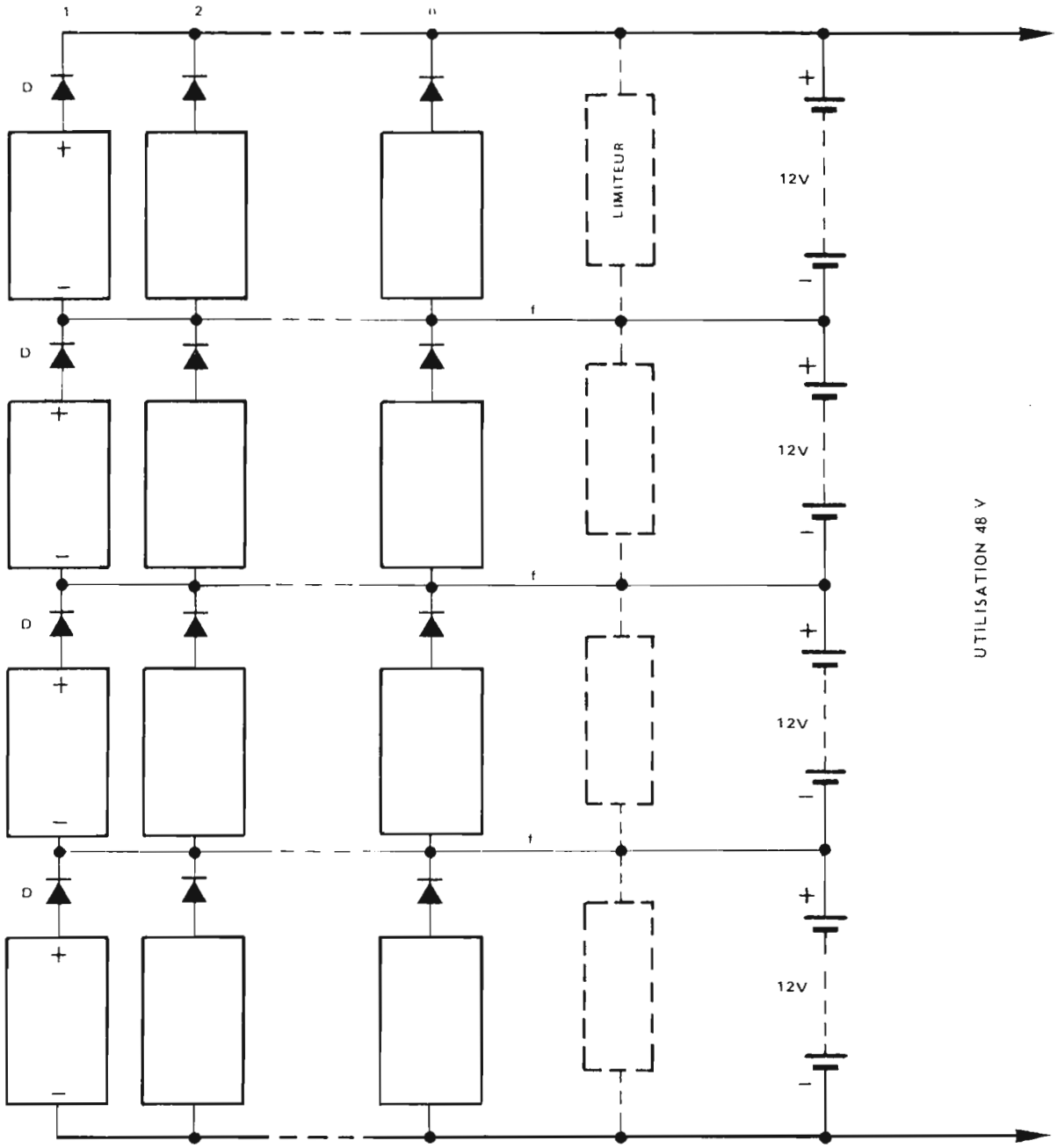


FIGURE 36 - Station de 4 n modules BPX 47 A en 48 V

Remarques :

Les conducteurs F n'intervenant qu en cas de déséquilibrage, leur section peut être faible.

III.4.4 Montage simplifié

Dans le cas d'un assemblage de modules avec batterie dont la tension minimale est surveillée, de sorte à déconnecter la charge dès que la tension de celle-ci baisse en dessous d'une certaine valeur (44 V pour 48 V nominal), un montage suivant figure 37 peut être effectué.

Ce style d'interconnexion pourra être utilisé pour des équipements ne dépassant pas 48 V.

Remarque :

Pour assurer la sécurité électrique, des fusibles **FERRAZ - « PROTISTOR »** choisis pour un calibre 10 fois supérieur au courant maximal, sont disposés sur tous les câbles partant de la borne positive de la batterie.

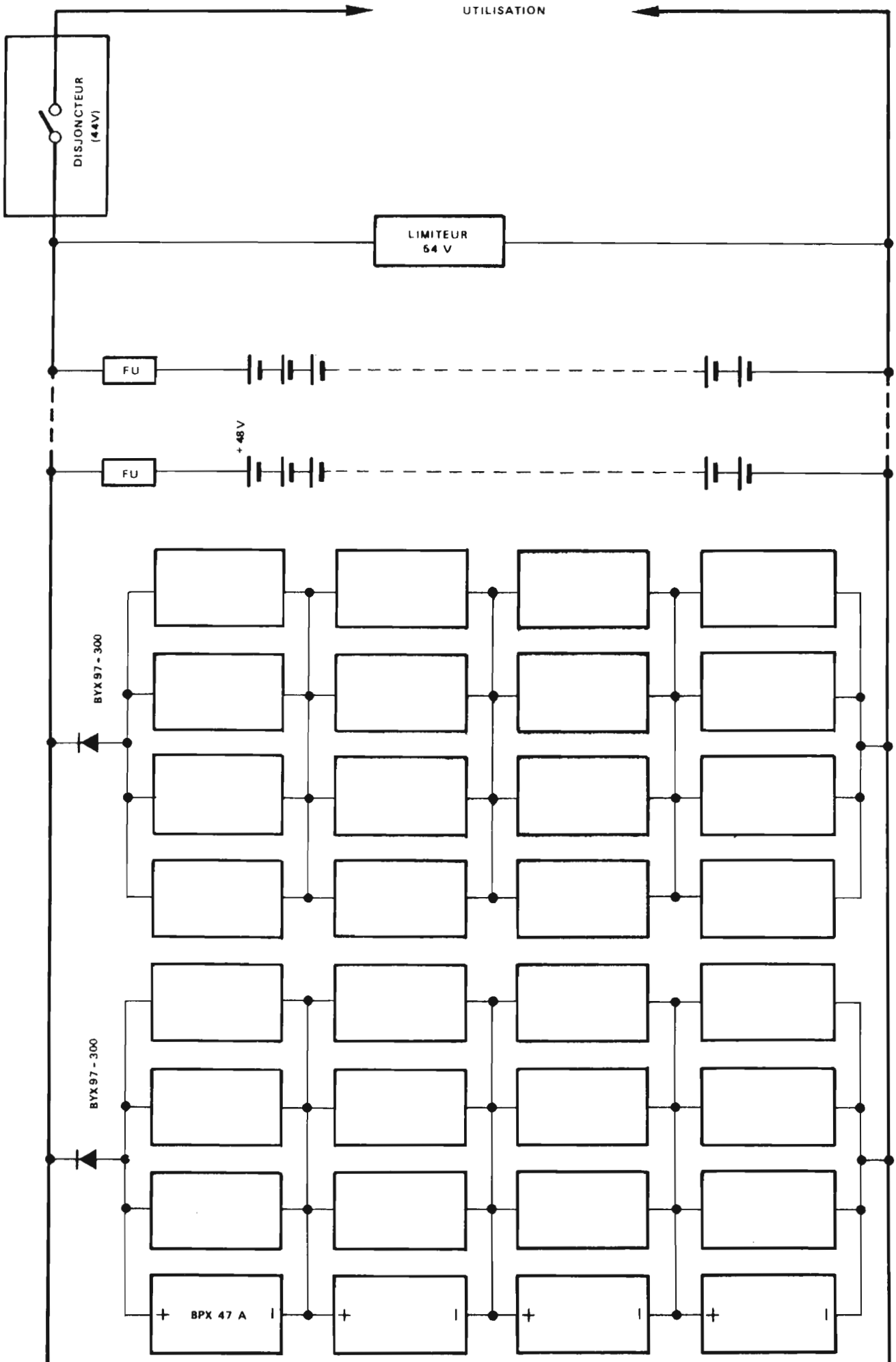


FIGURE 37

MONTAGE SIMPLIFIE n × 16 modules BPX 47 A - Le disjoncteur pour tension minimale est indispensable

IV - GENERATEURS SOLAIRES SANS BATTERIE

De tels générateurs sont le plus souvent destinés à l'alimentation de moteurs à courant continu.

Alors que la tension de batterie évite de pénétrer dans la zone dangereuse, un montage sans batterie sera d'autant plus agressif pour les modules, qu'ils seront nombreux en série.

Ne pas oublier qu'un moteur à l'arrêt doit être assimilé pratiquement à un court circuit.

Pour limiter la pénétration dans la zone de contrainte thermique à V = o, il est conseillé de disposer une diode en parallèle sur chaque groupement de module en série.

IV.1 ROLE DE LA DIODE PARALLELE (figure 38)

Soit 2 modules A et B en série, mis en court-circuit sous 1 kW/m², si l'un des modules B a une cellule très partiellement masquée, la tension développée par A (+ 14 V) se trouve appliquée en inverse sur B.

Ce module B sera donc assez rapidement détruit puisque nous sommes dans le quadrant (4) avec une cellule supportant la puissance de 34 + 33 = 67 cellules, soit 18 W environ.

En disposant d'une diode dite de protection par module, le courant imposé par le module A se partage dans la diode D_B et le module B.

La puissance dissipée sur la cellule partiellement masquée du module B est réduite de moitié par rapport à la configuration précédente.

Mais le module B travaille encore dans la zone de contrainte thermique, de plus le module A voit sa tension tomber à 0,8 W, il se trouve désormais également dans la zone dangereuse. Les 2 modules A et B risquent maintenant la destruction, mais dans un temps plus long que sans diodes.

Les diodes parallèles offrent donc l'avantage de répartir les puissances dans chaque module, lorsque la tension sur l'utilisation baisse anormalement.

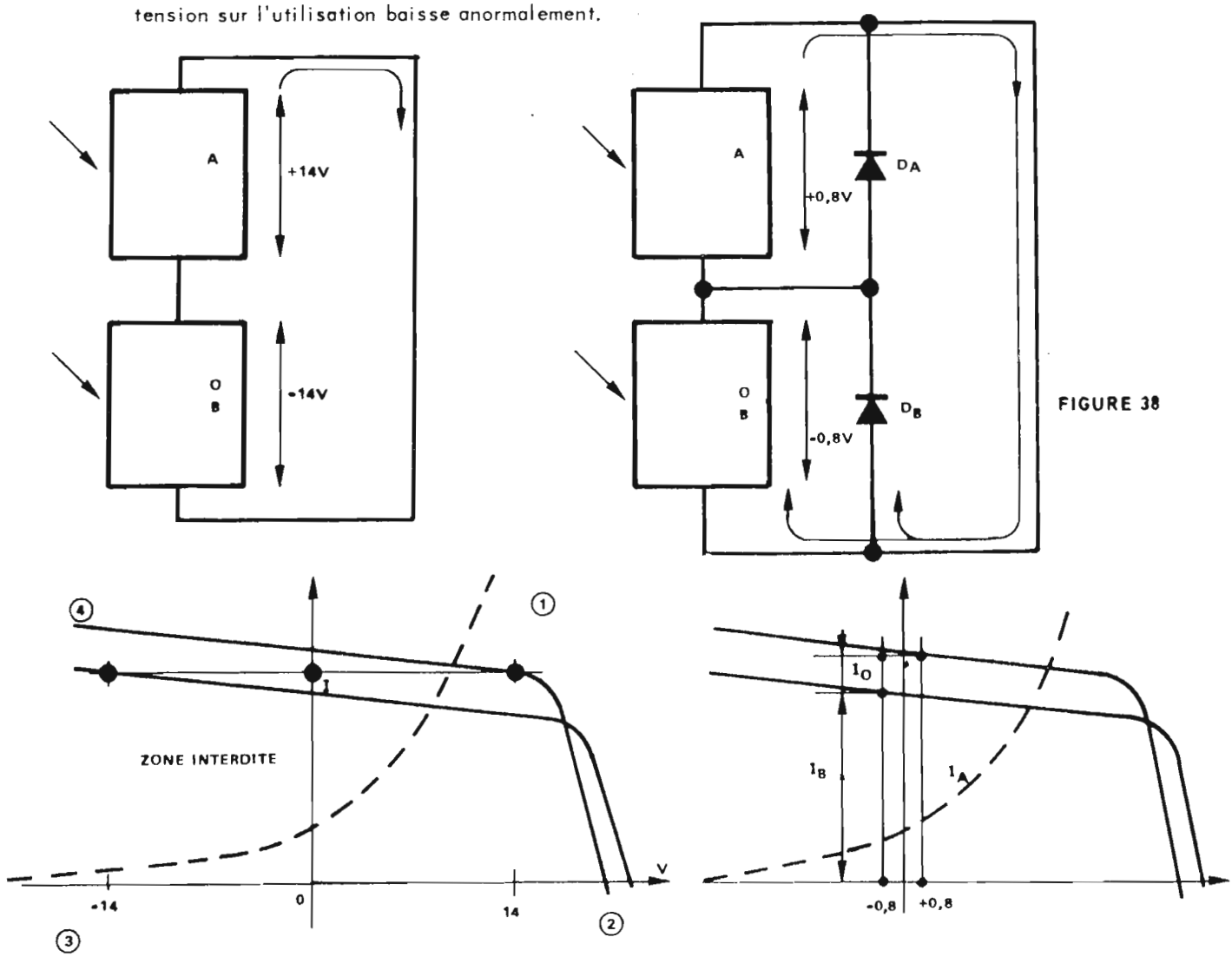


FIGURE 38

IV.2 DEMARRAGE RHEOSTATIQUE

Dans la mesure où le couple de démarrage du moteur n'est pas trop élevé, le système des figures 39 et 40 peut être envisagé.

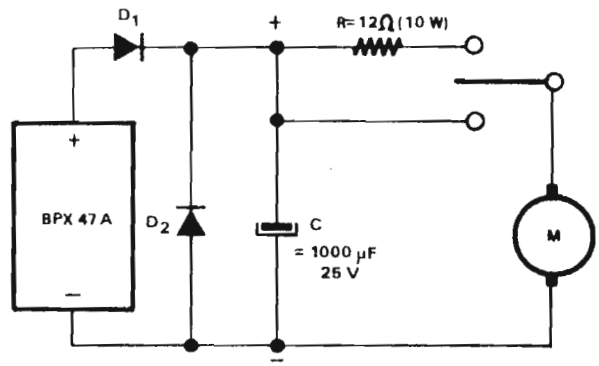


FIGURE 39

Les diodes D_1 et D_2 (BYX 42-300 ou BYW 31-150) évitent d'appliquer une tension inverse ou trop élevée sur le module en cas d'inversion de polarité sur le moteur ou fonctionnement en génératrice.

D_2 protège également le condensateur de découplage.

La commutation du rhéostat s'effectue pour 14 Volts environ aux bornes de la photopile.

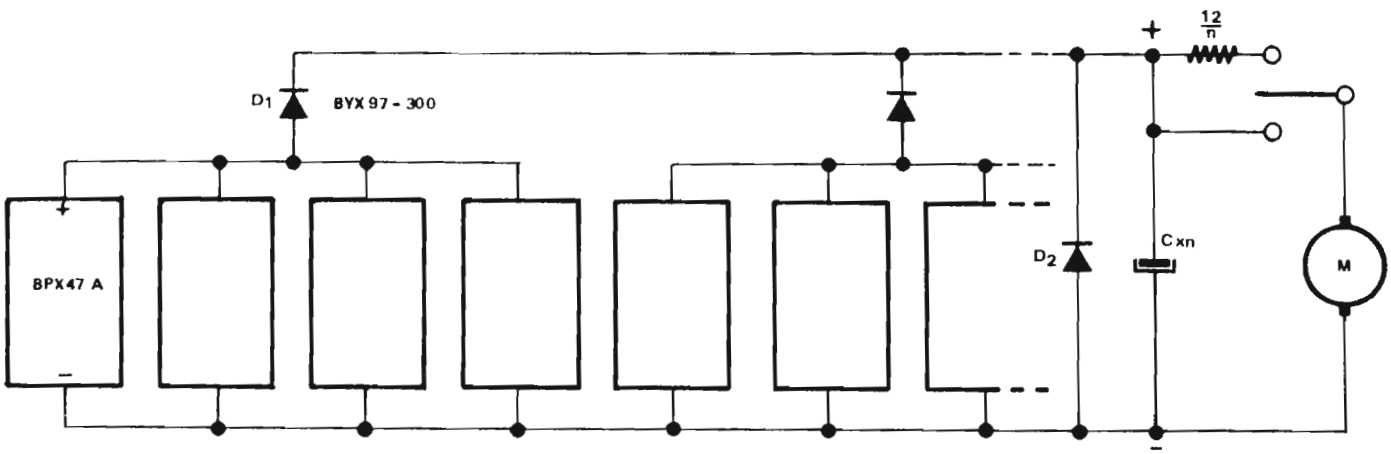


FIGURE 40

Démarrage rhéostatique sur n module BPX 47 A

D_1 = D_2 = BYX 97-300

IV.3 DEMARRAGE PAR COMMUTATION DE MODULES

Le démarrage d'un moteur exige une forte intensité sous une tension faible, il est donc préférable de grouper le maximum de modules en parallèle au départ et de connecter en série les modules ou groupes de modules dès que le régime moteur le permet.

Exemple :

- Commutation 12, 24, 48 volts - figure 41

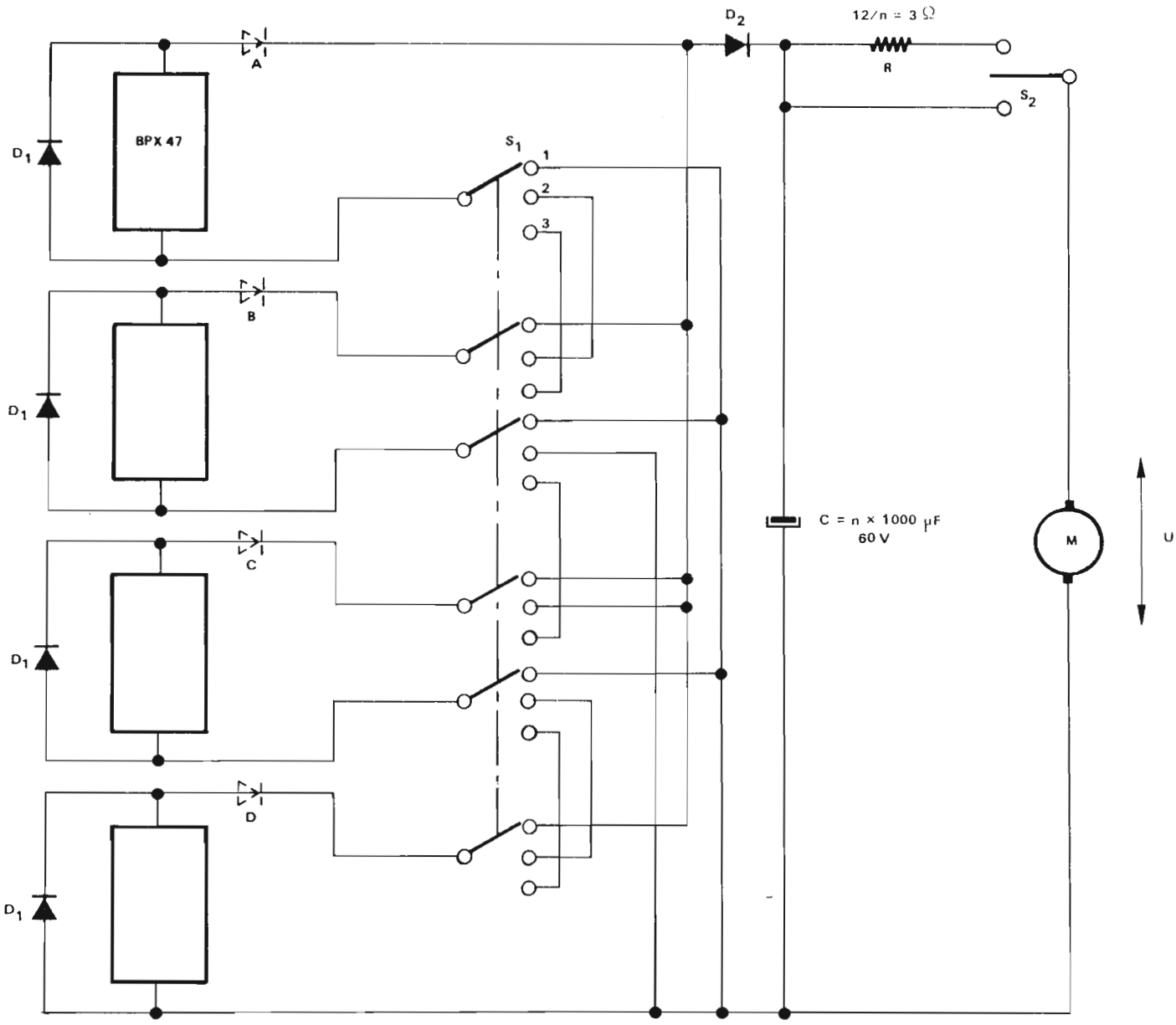


FIGURE 41 - Commutation de 4 modules BPX 47 A
D_1 = BYX 42-300 ou BYW 31-150
D_2 = BYX 97-300

Pour des groupements de 2 à 4 modules prévoir :
1 diode BYX 97-300 aux emplacements A, B, C et D.

Pour des groupements de 5 à 12 modules prévoir :
1 diode BYX 97-300 sur radiateur 5 cm PROFIL F LESSEL

Pour une station de n modules, le commutateur S_1 (6 circuits - 3 positions de une combinaison de relais équivalente) sera de préférence commandée automatiquement.

Position 1 - Démarrage avec $R = \frac{12}{n}\ \Omega$ jusqu'à 14 V, puis par action du commutateur S_2, $R = 0$.

Position 2 - Pour I moteur $\leqslant \frac{n}{2} I_L$ relatif à l'éclairage du moment et $U \geqslant 16$ volts

Position 3 - Pour I moteur $\leqslant \frac{n}{4} I_L$ et $U \geqslant 32$ volts.

Si la charge du moteur augmente ou si l'éclairement diminue, la tension aux bornes de la machine tend à baisser, le passage des commutations s'effectuera suivant les critères ci-après :

Position 3 → $U \geqslant 30$ V

Position 2 → $30 \leqslant U \leqslant 14$

Position 1 → $U \leqslant 12$

La trajectoire de démarrage du moteur est représentée sur le diagramme figure 42.

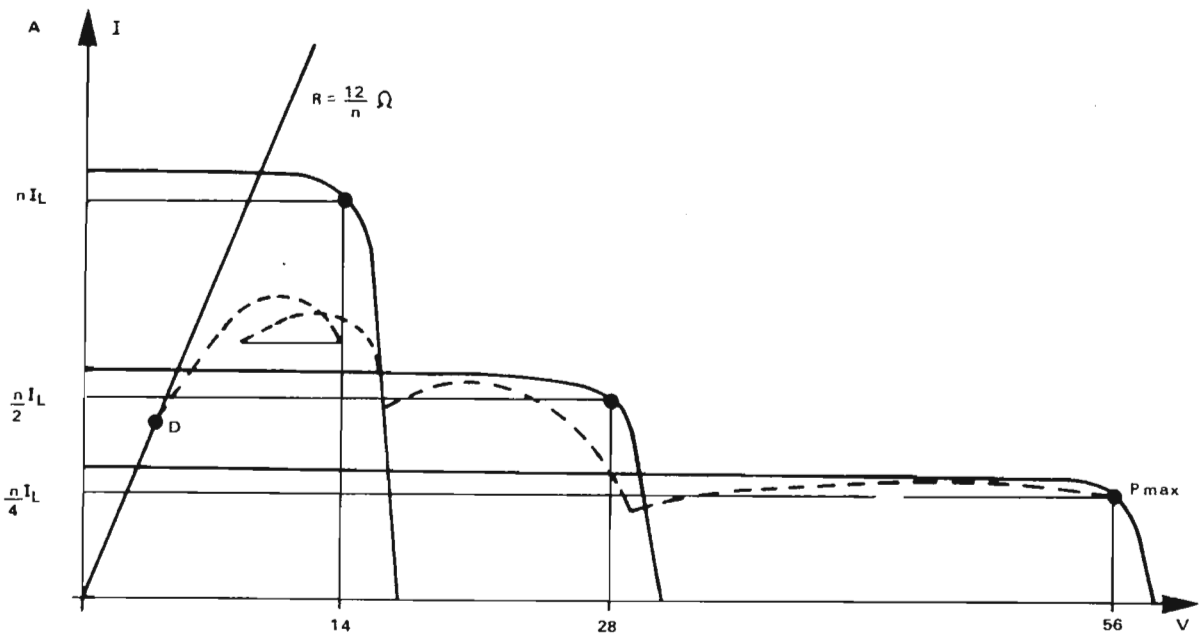


FIGURE 42

V - CONCLUSION

A partir des généralités exposées dans cette brochure, il sera possible de trouver des solutions adaptées aux différentes applications des photopiles dans des domaines extrêmement variés.

Nous citerons ici, pour mémoire, quelques dispositifs pouvant être alimentés par photopiles :

- Radio balises (radio-phares)
- Radio bornes téléphoniques d'autoroute
- Balises et phares optiques
- Réémetteurs télévision ou FM
- Emetteurs-récepteurs portables de l'armée
- Faisceaux hertziens
- Stations météorologiques
- Caméra de prise de vue professionnelles (exploration)
- Téléviseurs et récepteurs de radiodiffusion
- Moteur de pompe à eau, pétrole, etc...
- Cuves électrolytiques de raffinage
- Chambres frigorifiques
- Mini-centrales d'énergie électrique pour habitation isolée ou petite agglomération
- Compensation des courants telluriques sur ouvrages d'art
- Clôtures électriques
- Equipements électriques des voiliers
- Signalisations de chantier

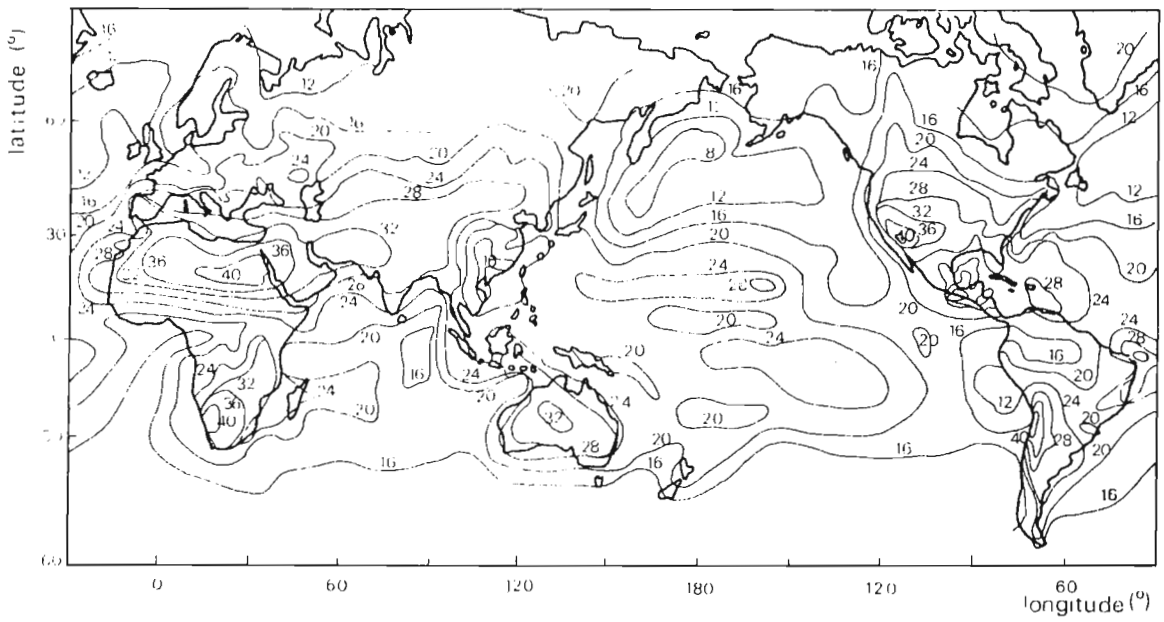


PLANCHE I

Courbes d'égal ensoleillement annuel de la Terre

Les cotes portées sont des centaines d'heures.
L'absence totale de nébulosité correspondrait à
4 382 heures de soleil par an.

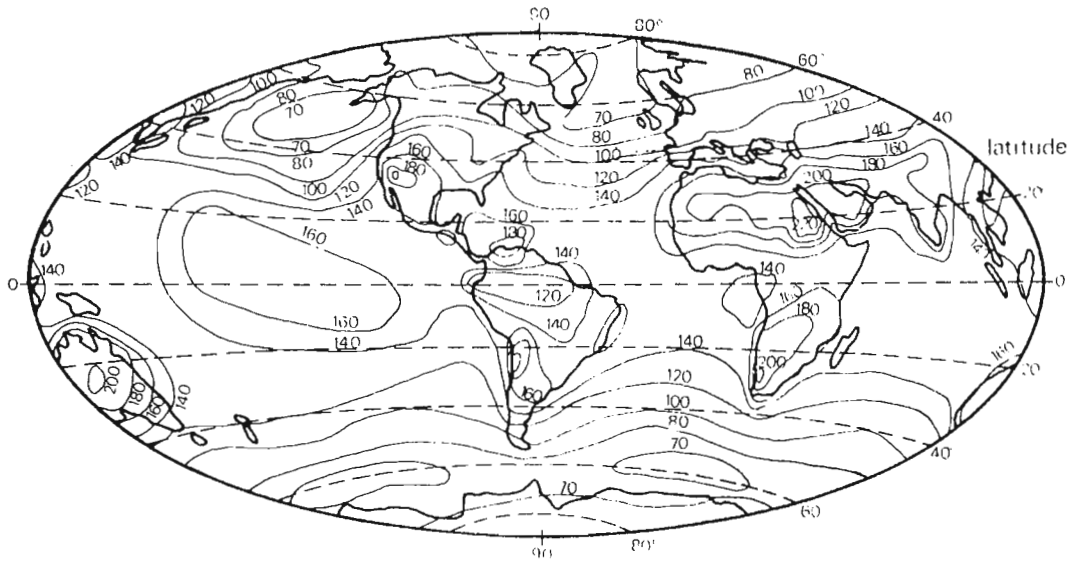
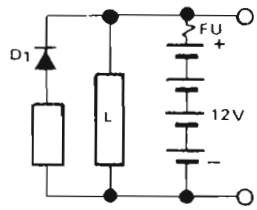


PLANCHE II

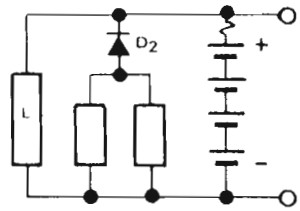
Courbes d'égale irradiation annuelle $\mathcal{E}_s$ de la Terre au niveau du sol

Les cotes portées correspondent à l'irradiation moyenne journalière exprimée en 10^5 J . m^{-2}.
10^7 J . m^{-2} . jour^{-1} ⟷ 115,8 W . m^{-2} ⟷ 3,65 . 10^9 J . m^{-2} . an^{-1}.

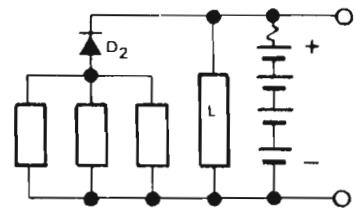
ASSEMBLAGES EN 12 V



1 - BPX 47 A

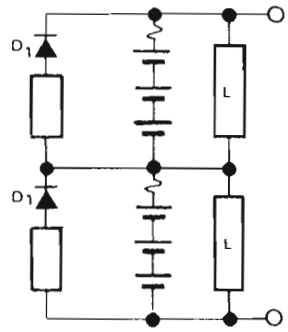


2 - BPX 47 A

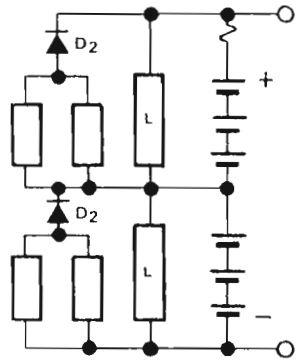


3 - BPX 47 A

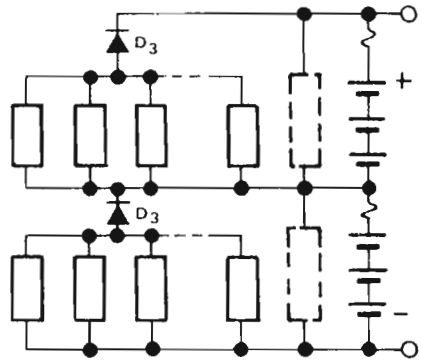
ASSEMBLAGES EN 24 V



2 - BPX 47 A

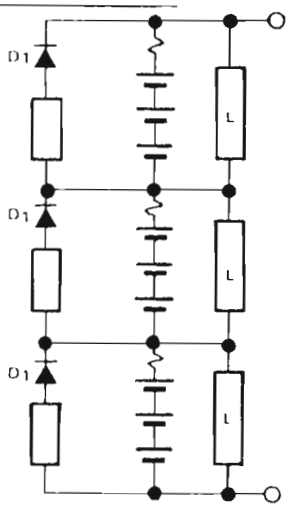


4 BPX 47 A

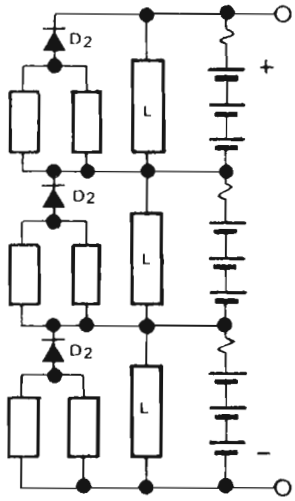


8 à 24 BPX 47 A

ASSEMBLAGES EN 36 V

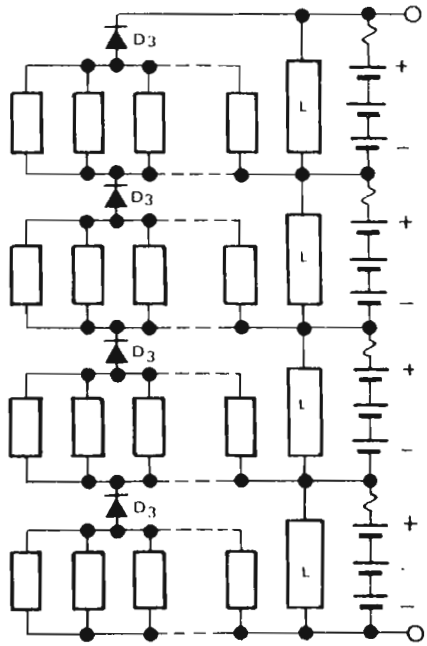


3 BPX 47 A



6 BPX 47 A

ASSEMBLAGES EN 48 V



16 a 48 BPX 47 A

LEGENDE

BPX 47 A

LIMITEUR

D1 BYX 42 - 300
OU BYW 31 - 150

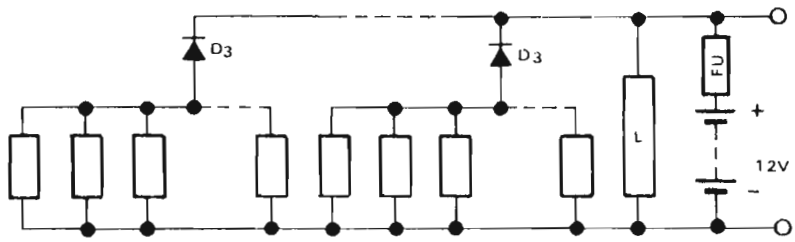
D2 BYX 97 - 300

D3 BYX 97 - 300
SUR 5cm PROFIL F LESSEL

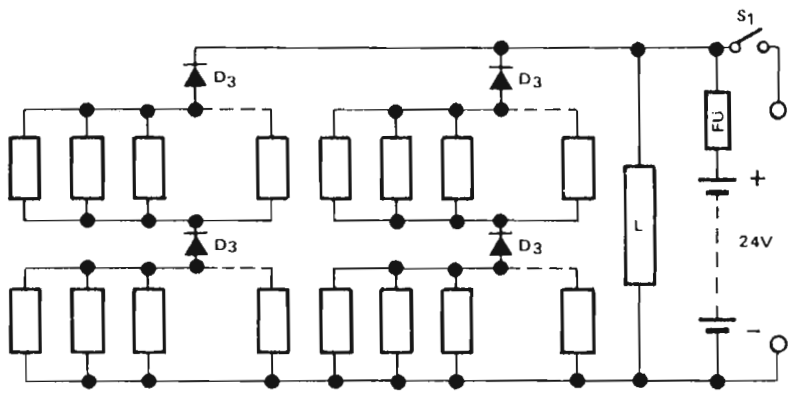
S1 CONTACTEUR U min

PLANCHE III

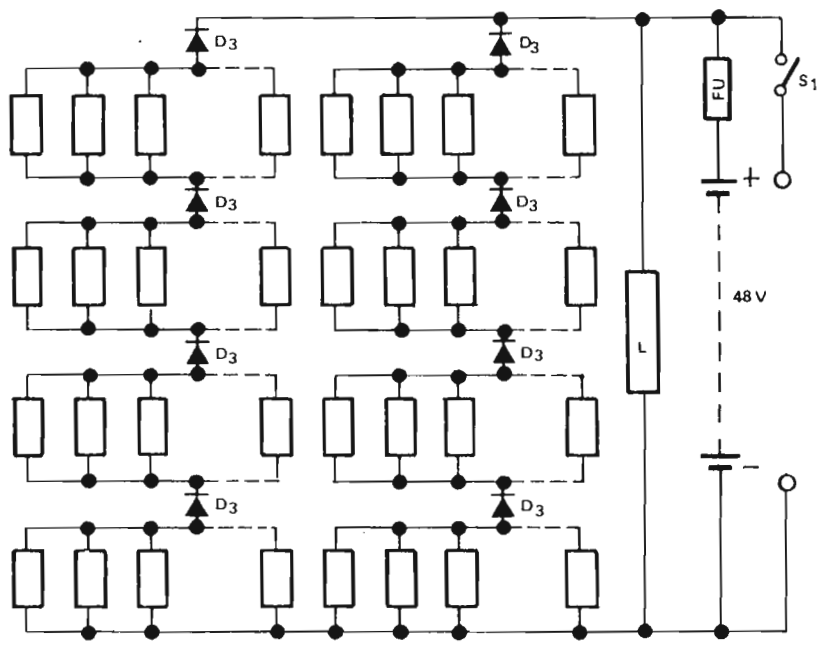
Assemblages des « BPX 47 A » avec batterie



n 4 à n 12 BPX 47 A

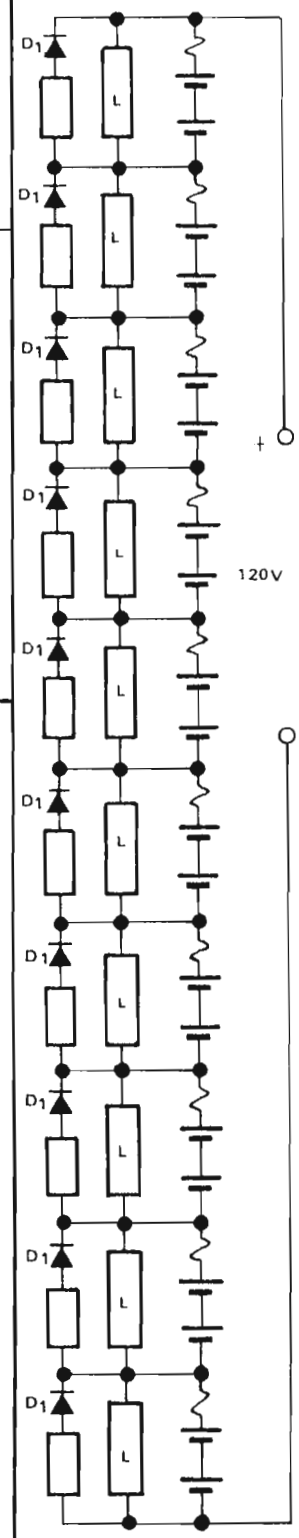


n 8 à n 24 BPX 47 A



n 16 à n 48 BPX 47 A

ASSEMBLAGE EN 120 V



10 - BPX 47 A

Relation entre surface des photopiles et capacités de batterie d'accumulateurs

RAPPEL

La méthode de détermination des batterie su une station terrestre à photopile était préconisée par le Laboratoire d'Application R.T.C., depuis 1970 (voir note 12.67), en totalisant mois par mois l'excès ou le défaut des A h produit par des modules inclinés suivant la latitude du lieu.

Ce calcul était fait en supposant que la surface des photopiles était juste suffisante pour fournir l'énergie demandée à partir de l'ensoleillement moyen annuel.
Si cette méthode reste entièrement valable lorsque l'on possède les résultats d'ensoleillement mois par mois, elle ne permet pas pour autant de calculer les batteries lorsque l'on ne dispose que des informations données sur les cartes d'ensoleillement de janvier, juillet ed annuelles.

D'autre part, la diminution du prix des photopiles et l'augmentation du coût des batteries d'accumulateur modifient l'esprit même de la conception des stations pour lesquelles la recherche d'une surface minimale de photopile n'est plus l'objectif principal.

RELATION FONDAMENTALE

Depuis 1972, le Laboratoire d'Applications propose d'utiliser sur les stations terrestres une capacité de batterie

$$C = \frac{C_T}{\pi} \times \frac{\Delta H\ m}{H\ m}$$

où

C = Capacité réelle en A h à installer, compte tenu du débit moyen demandé.

C_T = Capacité théorique qui serait nécessaire s'il n'y avait pas de photopiles pour assurer l'autonomie de la station sur un an

$$C_T = \frac{P}{U} \times 8760 \quad \text{en A h .}$$

H m = heures d'ensoleillement moyen mensuel.

$\Delta H\ m = \dfrac{H\ max - H\ min}{2}$, H max étant le nombre d'heures d'ensoleillement du mois le plus favorable, et H min celui du mois le plus sombre de l'année.

L'inclinaison de la structure supportant les modules est égale à la latitude du lieu

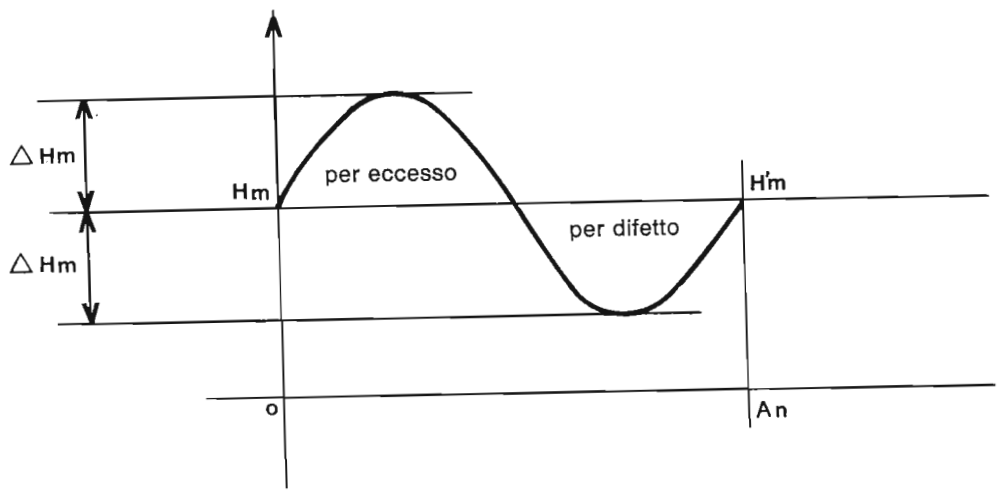


FIGURE 1

Cette relation est établie en prenant pour hypothèse que la variation des heures d'insolation mensuelle sur l'année est d'allure sinusoïdale (fig.1) autour de la valeur moyenne H m. Les A h produits par les photopiles suivront les ordonnées de cette courbe.

La surface O, H m, H' m, A n représente la capacité théorique C_T que demande la station sur l'année et que fournit la photopile.

$$(1) \quad C_T = H\,m \times A\,n \Longleftrightarrow \frac{P}{U} \times 8760$$

Les A h en excès, étant égaux aux A h en défaut, sont représentés par la surface de chaque demi-sinusoide.
La capacité nécessaire, pour restituierl'hiver l'énergie reçue en excès l'été, est donc :

$$(2) \quad C = \frac{2\,\Delta H\,m}{\pi} \times \frac{A\,n}{2}$$

de la relation (1) il vient $A\,n = \frac{C_T}{H\,m}$ et par substitution dans (2) :

$$C = \frac{C_T}{\pi} \times \frac{\Delta H\,m}{H\,m}$$

REDUCTION DE LA CAPACITÉ DES BATTERIES

Afin de réduire le poids et le prix des équipements, on souhaite diminuer la capacité des accumulateurs et pour ce faire, on dispose de 2 méthodes :

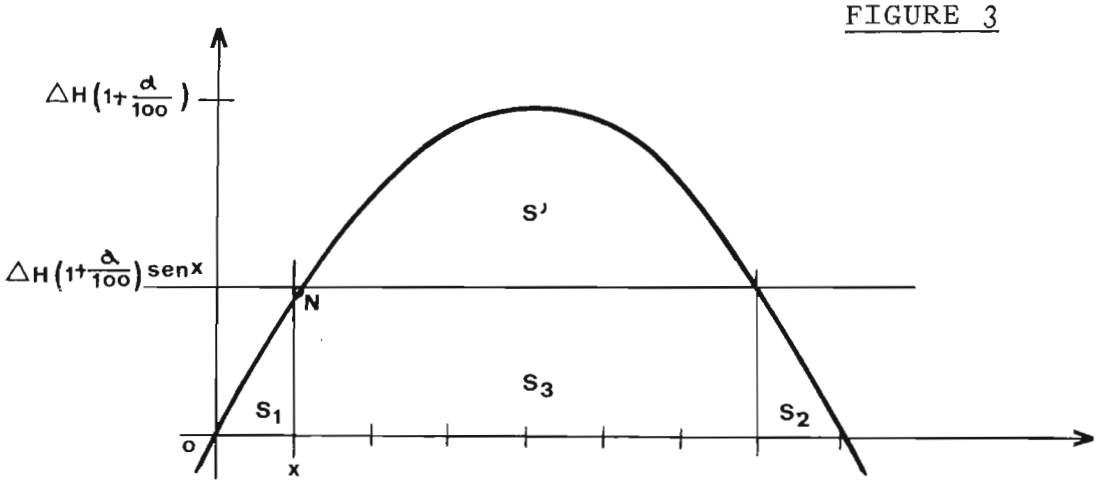
1°) Augmentation de surface des photopiles

Tout en conservant l'inclinaison égale à la latitude du lieu, si l'on augmente de α % le nombre des modules, la représentation de la figure 1 se transpose en la figure 2.

La capacité de la batterie se trouve alors réduite à la surface hachurée.

Opérons un changement d'axe et appelons x l'abcisse du point N (figure 3)

FIGURE 3



Pour une sïnusoide d'amplitude 1, la primitive de la fonction

$$y = \sin x \quad \text{est} \quad \mathcal{A}(x) = -\cos x$$

La surface

$$S1 = 1 - \cos x$$

$$S1 + S2 = 2 - 2\cos x$$

$$S3 = (\pi - 2x)\sin x$$

$$S + S2 + S3 = 2 - 2\cos x + (\pi - 2x)\sin x$$

La surface totale de la demi-sïnusoide étant 2

la surface

$$S' = 2 - (S_1 + S_2 + S_3)$$

$$= 2\cos x - (\pi - 2x)\sin x$$

Pour une sïnusoide d'amplitude $\Delta H\ (1 + \frac{}{100})$

$$S' = \Delta H\left[2\cos x - (\quad -2x)\sin x\right]\left(1 + \frac{\alpha}{100}\right)$$

Lorsque les photopiles sont calculées au plus juste, la surface correspondant à la capacité normale de batterie est:

$$S = 2 \cdot \Delta H$$

Le coefficient de réduction relatif à une augmentation α % de phototype est donc :

$$k = \frac{S'}{S} = \left[\cos x - \left(\frac{\pi - 2x}{2}\right) \sin x\right]\left(1 + \frac{\alpha}{100}\right)$$

D'autre part :

$$\Delta H \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right) \sin x = \frac{\alpha}{100} H$$

d'où

$$\sin x = \frac{\alpha}{100+\alpha} \cdot \frac{H}{\Delta H}$$

Nous pouvons donc en prenant α % en paramètre, tracer les courbes de k en fonction de

$$\frac{\Delta H}{H} .$$

Les calculs effectués permettent d'établir la figure 4.

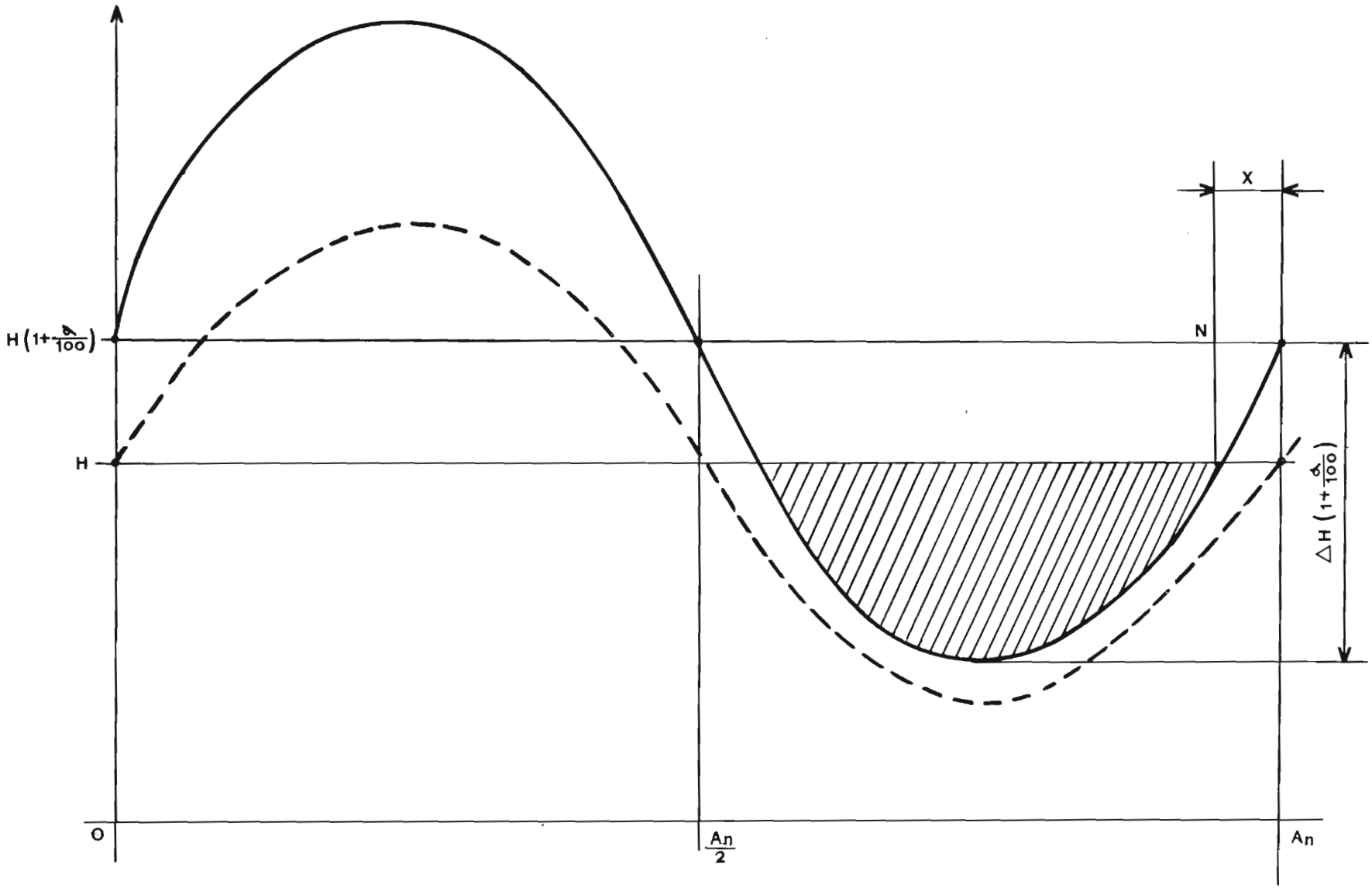


FIGURE 2

$\Delta H / H$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$= 5\ \%$											
sin x	0,952	0,476	0,238	0,158	0,119	0,095	0,079	0,068	0,059	0,052	0,047
cos x	0,309	0,878	0,972	0,987	0,993	0,995	0,996	0,997	0,998	0,998	0,999
x	1,25	0,49	0,235	0,158	0,119	0,095	0,079	0,068	0,059	0,052	0,047
k	0,006	0,382	0,687	0,801	0,862	0,897	0,922	0,939	0,954	0,996	0,973
$\alpha = 10\ \%$											
sin x		0,909	0,454	0,303	0,227	0,181	0,151	0,129	0,113	0,101	0,091
cos x		0,414	0,891	0,952	0,974	0,983	0,988	0,991	0,993	0,994	0,995
x		1,14	0,47	0,31	0,228	0,182	0,151	0,129	0,113	0,101	0,091
k		0,026	0,431	0,628	0,749	0,805	0,851	0,886	0,911	0,930	0,947
$\alpha = 20\ \%$											
sin x			0,833	0,555	0,416	0,333	0,277	0,238	0,208	0,185	0,166
cos x			0,551	0,830	0,915	0,945	0,962	0,972	0,978	0,982	0,986
x			0,986	0,58	0,42	0,34	0,28	0,24	0,21	0,188	0,166
k			0,078	0,337	0,524	0,643	0,72	0,786	0,834	0,872	0,903
$\alpha = 30\ \%$											
sin x				0,769	0,576	0,461	0,384	0,329	0,288	0,256	0,230
cos x				0,640	0,817	0,887	0,922	0,943	0,957	0,964	0,973
x				0,87	0,61	0,48	0,395	0,335	0,290	0,26	0,23
k				0,132	0,343	0,500	0,612	0,698	0,765	0,817	0,864

$\Delta H / H$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
α = 40 %											
sin x				0,952	0,714	0,571	0,476	0,408	0,357	0,317	0,285
cos x				0,309	0,700	0,820	0,878	0,913	0,933	0,948	0,959
x				1,25	0,79	0,61	0,49	0,42	0,366	0,322	0,288
k				0,007	0,200	0,380	0,509	0,621	0,683	0,774	0,831
α = 50 %											
sin x					0,833	0,666	0,555	0,476	0,416	0,370	0,333
cos x					0,551	0,745	0,830	0,879	0,91	0,920	0,945
x					0,986	0,730	0,58	0,49	0,42	0,38	0,34
k					0,097	0,279	0,421	0,546	0,655	0,730	0,804
α = 60 %											
sin x					0,937	0,75	0,625	0,535	0,468	0,416	0,375
cos x					0,35	0,66	0,78	0,844	0,885	0,91	0,927
x					1,21	0,84	0,67	0,56	0,48	0,42	0,38
k					0,019	0,179	0,347	0,486	0,60	0,699	0,769

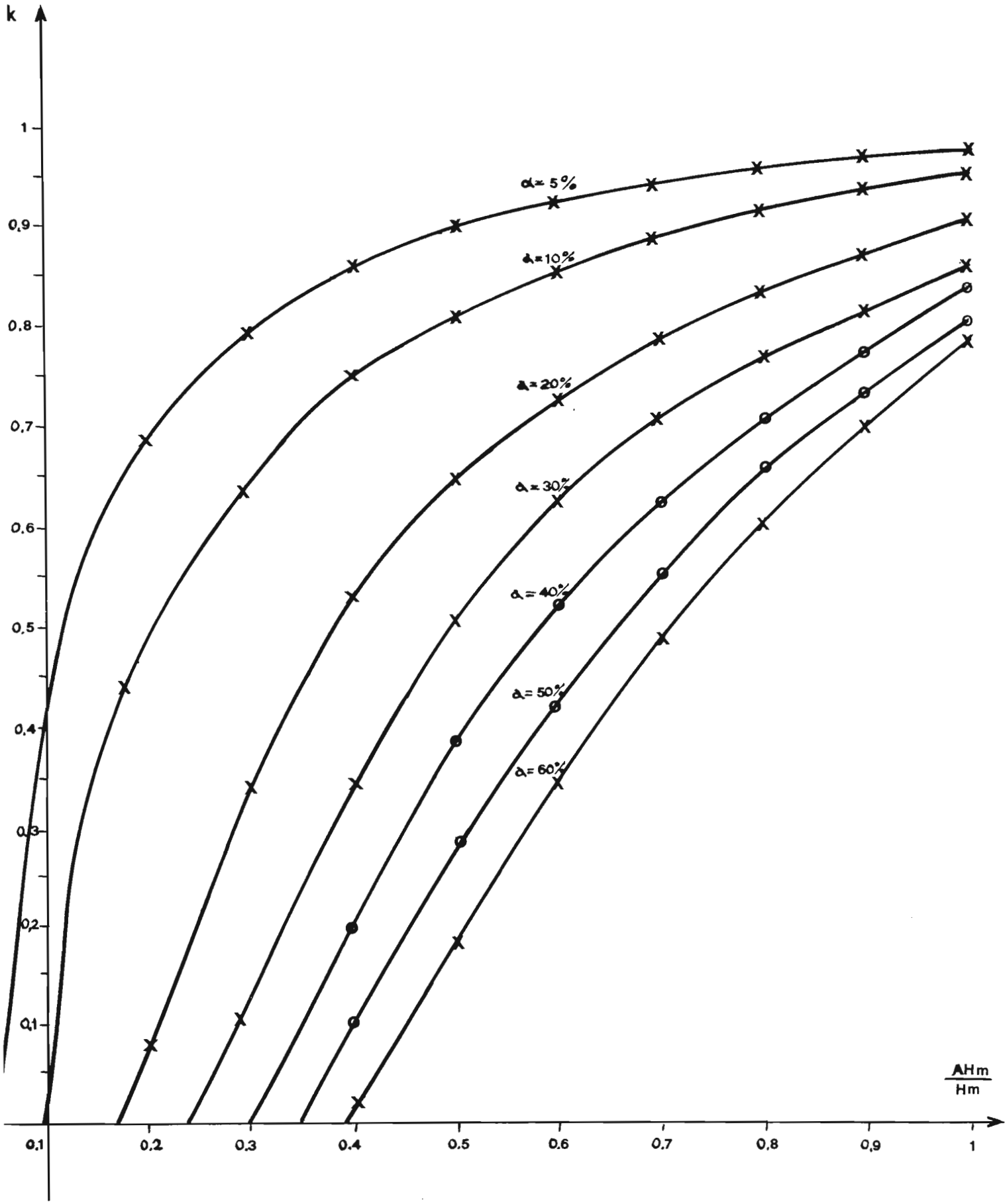

k
1
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
α = 5%
α = 10%
α = 20%
α = 30%
α = 40%
α = 50%
α = 60%
AHm / Hm
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1

FIGURE 4

2°) Inclination forcée de la structure à photopiles

Cette méthode consiste à réduire les écarts de production d'énergie entre l'hiver et l'été, en inclinant davantage la photopile pour obtenir une incidence plus favorable l'hiver.

L'intérêt de cette procédure réside non seulement dans la diminution de la capacité des batteries, mais également dans une réduction de l'encrassement et une diminution de dimensionnement du limiteur.

En contre partie, l'énergie moyenne convertie étant plus faible que sous l'inclinaison égale à la latitude du lieu, une augmentation du nombre de module doit être envisagée.

De plus, par un accroissement supplémentaire de module la précédente méthode peut coopérer avec celle-ci.

RAPPEL

L'oscillation de la planète de $\pm$ 23° 27' autour de sa position d'équilibre durant l'année provoque (lorsque les modules sont inclinés par rapport à l'horizontal d'un angle correspondant à la latitude du lieu) une modulation du rendement de conversion des photopiles, suivant une évolution d'allure sinusoidale de périodicité 6 mois et d'amplitude crête à crête de l'ordre de 8,3 %, nécessitant un accroissement de surface des photopiles de 4,15% par rapport à ce qui serait nécessaire si la terre n'oscillait pas.

En effet $\cos 23° \; 27' = 0,917$

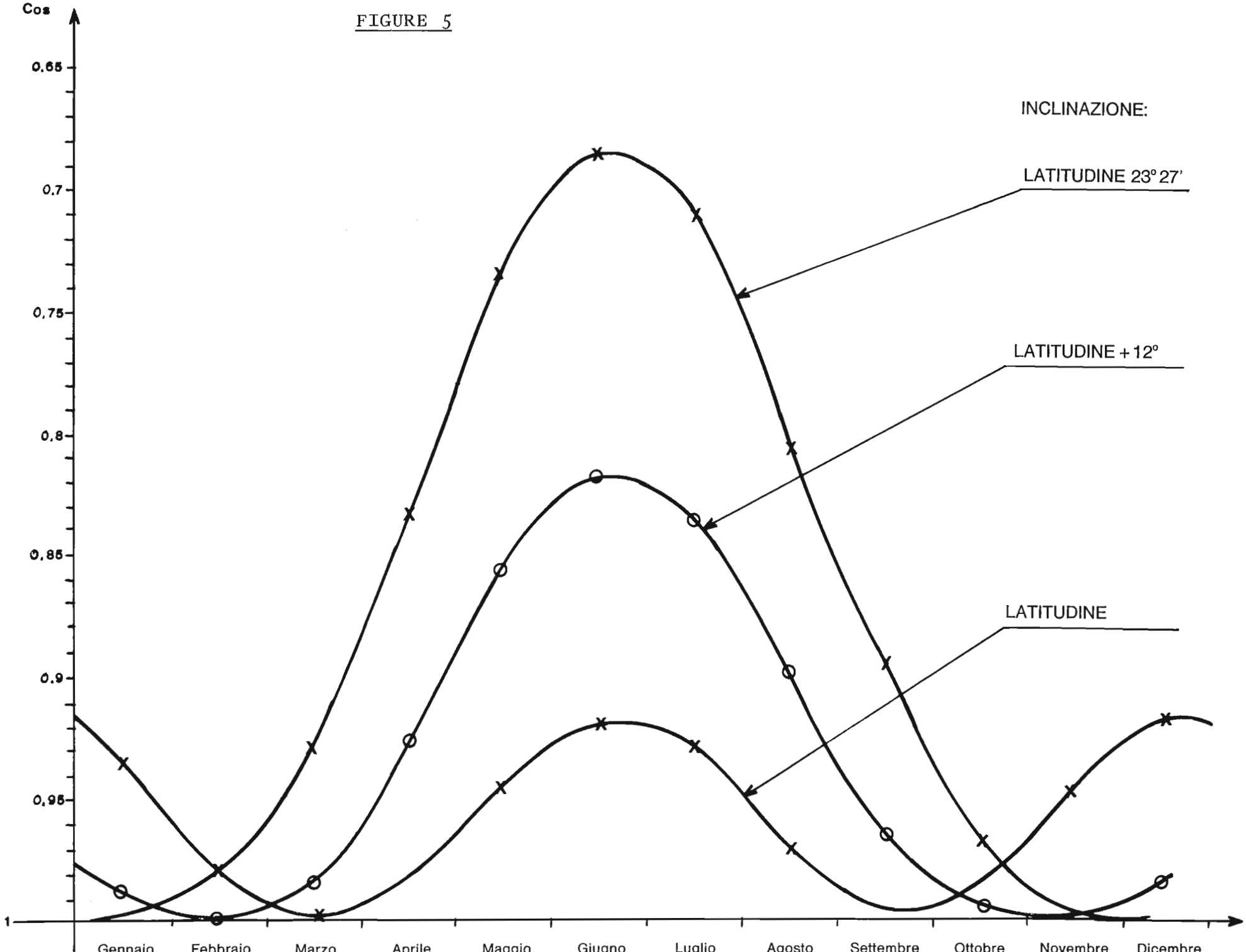
Toutefois ce sistème a l'inconvénient de ne pas corriger la diminution notable d'énergie reçue dans l'hémisphère nord pendant les mois d'hiver et de provoquer une surcharge des batteries pendant l'été.

Solution proposée

Une inclinaison plus prononcée des photopiles a l'avantage comme le montre le tableu ci-après et les courbes de la figure 5, de provoquer une fluctuation de périodicité annuelle favorisant la conversion en hiver et la réduisant en été.

MOIS	Déclinaison moyenne sur 30 jours	Module incliné suivant lat.		Module incliné suivant lat.+12°		Module incliné suiv. lat. + 23° 27'	
		Incid.	cos	Incid.	cos	Incid.	cos
JANVIER	-20° 48'	→	0,933	-8° 48'	0,987	2° 39'	0,999
FEVRIER	-12° 42'		0,976	-0° 42'	1	10° 45'	0,981
MARS	- 1° 54'		0,999	10° 06'	0,984	21° 06'	0,933
AVRIL	+ 9° 54'		0,984	21° 54'	0,927	33° 21'	0,834
MAI	+18° 54'		0,945	30° 54'	0,857	42° 21'	0,737
JUIN	+23° 06'		0,920	35° 06'	0,819	46° 33'	0,688
JUILLET	+21° 18'		0,930	33° 18'	0,835	44° 45'	0,710
AOUT	+13° 42'		0,972	25° 42'	0,898	37° 09'	0,798
SEPTEMB	+ 3°		0,998	15° 00'	0,966	26° 27'	0,895
OCTOBRE	- 8° 48'		0,989	-3° 12'	0,998	14° 39'	0,968
NOV.	-18° 24'		0,948	-6° 24'	0,993	5° 03'	0,996
DEC.	-23°		0,920	-11°	0,981	0° 27'	1

FIGURE 5


Cos
0,65
0,7
0,75
0,8
0,85
0,9
0,95
1
INCLINAZIONE:
LATITUDINE 23° 27'
LATITUDINE + 12°
LATITUDINE
Gennaio
Febbraio
Marzo
Aprile
Maggio
Giugno
Luglio
Agosto
Settembre
Ottobre
Novembre
Dicembre

ESEMPI D'IMPIEGO

I - introduction

Cette brochure a pour objet d'illustrer l'activité « Cellules Solaires » menée chez RTC depuis 20 ans. Elle met en relief la chronologie des événements en même temps que la diversité croissante des applications qui font appel à l'énergie photovoltaïque.

Les spécifications techniques des modules solaires sont disponibles sur demande. En outre, pour aider à l'élaboration d'un projet, RTC est en mesure de proposer un calcul de dimensionnement de la station. Ce calcul, fourni à titre indicatif, permet à l'utilisateur d'aborder le problème dont il devra affiner ensuite la solution.

En outre, une notice d'application (ONA 104) est à la disposition des installateurs de stations photovoltaïques afin de leur fournir les éléments essentiels concernant l'association des modules entre eux et à leurs éléments périphériques.

I - introduction

This brochure illustrates the "solar cell" activities carried out by RTC over the last twenty years. It highlights not only the important events but also the growing variety of applications which call upon photovoltaic energy.

The technical specifications of solar panels are available on request. Furthermore, in order to assist users in the early stages of a project, RTC will calculate a suitable size for the station. This calculation is supplied as a guide only.

An application manual (ONA 104) is available to photovoltaic station installers in order to supply them with the basic information regarding the interconnection of modules and their peripheral equipment.

II - aujourd'hui l'énergie solaire

La France reçoit en moyenne 3,5 kWh/m²/jour, soit environ 700 milliards de MWh par an, soit encore 4000 fois environ sa consommation électrique actuelle.

Pour illustrer ces chiffres, on peut dire qu'il suffirait de recouvrir de cellules solaires au silicium, ayant un rendement de 10 %, une surface équivalente à 3 ‰ du territoire de la France pour fournir une énergie équivalente à la consommation électrique française.

En supposant que la République du Niger ait les mêmes besoins en électricité que la France, une superficie de cellules solaires au silicium d'environ 800 km² suffirait à fournir l'énergie nécessaire, compte tenu de l'ensoleillement très favorable.

Ces quelques chiffres mettent en évidence l'intérêt des cellules solaires pour la satisfaction des besoins en énergie, surtout dans les pays à fort ensoleillement où les lieux d'utilisation sont disséminés sur une grande superficie.

L'énergie récupérable par conversion photovoltaïque se présente d'une façon privilégiée parmi les énergies nouvelles, car elle est obtenue de manière statique avec un rendement convenable ; de plus, les générateurs photovoltaïques sont aisément adaptables aux besoins en énergie allant de quelques watts à quelques dizaines de kilowatts, ils sont faciles à installer et de maintenance réduite.

II - solar energy today

On an average, France receives 3.5 kWh/m²/day, or about 700 thousand million MWh per year, or approximately 4000 times its current electrical power consumption.

To illustrate these figures, it can be said that it would suffice to coat enough solar cells, giving a 10 % output, with silicon to cover 3 ‰ of the total surface area of France, to supply energy equivalent to France's electrical power consumption.

Assuming that the Republic of Niger had the same electrical requirements as France, silicon solar cells with a surface area of about 800 sq. kilometers would be sufficient to supply the energy required, due to the highly favourable sunshine conditions.

These figures show the advantage of solar cells for meeting energy requirements, particularly in countries with a great deal of sunshine where the locations are distributed over a large area.

Energy recoverable by photovoltaic conversion has certain advantages over other new power sources, since it is obtained statically and gives a reasonable output: in addition, photovoltaic generators are easily adapted to meet energy requirements from a few watts to several dozen kilowatts, are easy to install and require little maintenance.

III - 20 ans d'expérience

Les générateurs d'énergie réalisés avec des cellules solaires ne constituent pas une nouveauté, ils datent de plus de 20 ans ; les premiers satellites en étaient équipés afin d'assurer de façon autonome leur alimentation en électricité.

C'est la possibilité d'utiliser les cellules solaires de manière économique au sol qui a provoqué le surcroît d'intérêt dont elles jouissent.

RTC s'est distinguée au plan mondial, car dès l'origine, elle a pris en considération les possibilités d'exploitation au sol.

En effet, dès 1958, le développement de la première génération de modules solaires était entrepris par RTC à partir des études du Laboratoire d'Electronique et de Physique Appliquée (L.E.P.) et aboutissait en 1960 à la mise en place au Chili, d'un générateur solaire photovoltaïque de 88 W toujours en fonctionnement aujourd'hui.

RTC a donc contribué à ouvrir la voie à de nouveaux marchés dont la croissance actuelle est spectaculaire.

III - twenty years experience

Power generators using solar cells are not new, they are over 20 years old; the first satellites were fitted with them in order to provide an independent electrical power supply.

It is the possibility of using solar cells economically in more down - to - earth applications which has caused the increased interest in them.

RTC is one of the leading companies in the world of solar energy development. From the start, it has been considering the possibilities of exploiting this source of energy.

In fact, in 1958, the development of the first generation of solar cells was undertaken by RTC, based on studies by the Laboratoire d'Electronique et de Physique Appliquée (Laboratory of Electronics and Applied Physics). In 1960, this led to the installation in Chile of an 88 W photovoltaic solar generator, which is still functioning today.

RTC has thus contributed to opening up the way to new markets, the current growth of which is spectacular.

un générateur photovoltaïque en fonctionnement depuis 1960

Ce générateur photovoltaïque était prévu pour alimenter une petite installation de raffinage électrolytique du cuivre.

Cette installation expérimentale, mise en place en collaboration avec l'Université d'Antofogasta (Chili), avait pour objet de prouver la validité opérationnelle des générateurs photovoltaïques.

Elle a permis de mettre en évidence l'excellente tenue des caractéristiques des cellules au silicium dans les conditions climatiques du désert du Chili.

Ce générateur est composé de 144 modules, chacun comprenant 36 cellules de 19 mm de diamètre. Sous un ensoleillement de 1 kW/m², il délivre un courant de 26,5 A sous une tension de 3,3 V, soit une puissance de 87,45 W.

Après 19 ans d'exploitation, les caractéristiques courant-tension du générateur n'ont pas varié de manière perceptible.

a photovoltaic generator functioning since 1960

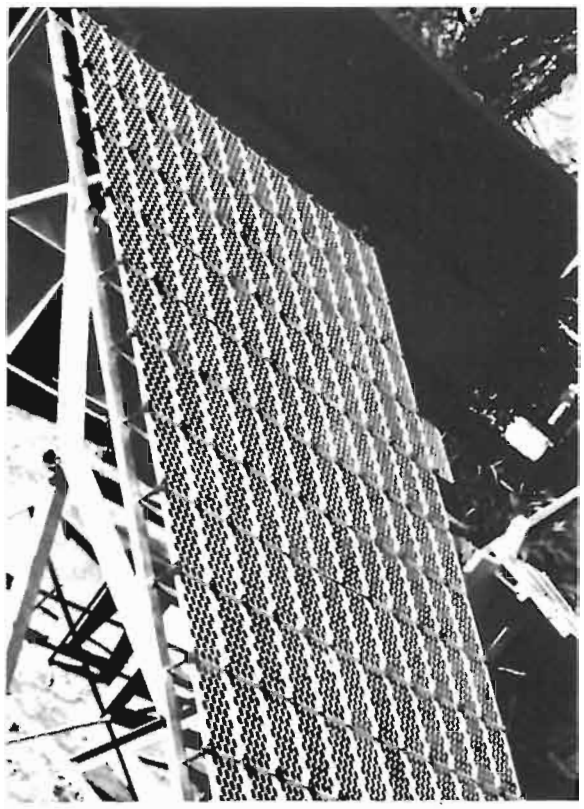
This photovoltaic generator was designed to supply a small electrolytic copper refining installation.

The purpose of this experimental installation, set up in cooperation with the University of Antofogasta (Chile) was to prove the operational validity of photovoltaic generators.

It demonstrated of the excellent resistance of the silicon cell to the Chile desert climatic conditions.

This generator consists of 144 panels, each comprising thirty six 19 mm diameter cells. For 1 kW/m² of sunshine, it produces 26.5 A at 3.3 V, i.e., an output of 87.45 W.

After 19 years operation, the current-voltage characteristics of the generator have not varied perceptibly.



Doc. Université d'Antofogasta
Doc. University of Antofogasta

5 générations de cellules solaires depuis 1960

Depuis 1960, RTC a développé et industrialisé 5 générations de modules solaires. Les trois premières ont contribué à rendre crédibles les applications de l'énergie solaire alors que seuls quelques précurseurs se préoccupaient des possibilités offertes.

La crise de l'énergie en 1973 a mis en évidence les contraintes des énergies fossiles et a suscité un vif intérêt pour les possibilités de l'énergie solaire et en particulier pour la conversion photovoltaïque.

D'importants travaux d'études, de développement et d'industrialisation ont alors été déclenchés dans le monde, visant à créer une industrie des cellules solaires. RTC, forte de l'expérience industrielle acquise et de l'expérience sur le terrain, commercialisait en 1975 sa quatrième génération de modules solaires, le BPX 47 A.

S'appuyant sur les résultats d'exploitation acquis avec ce dernier module, RTC a commercialisé début 1979, une cinquième génération réalisée à partir de cellules au silicium de diamètre 100 mm.

Cette cinquième génération comporte deux types principaux de modules :

— Le BPX 47 B, pour alimenter une batterie de 6 V, comprend 18 piles et fournit une puissance de 16,5 W sous une tension de 8,2 V.

  Une version comprenant 20 piles est plus particulièrement destinée aux applications sans batterie.

— Le BPX 47 C, pour alimenter une batterie de 12 V comprend 36 piles et fournit 33 W sous une tension de 16,4 V. Ce dernier module possède une structure autoportante et une boîte de connexion incorporée.

five generations of solar cells since 1960

Since 1960, RTC has developed and manufactured five generations of solar panels. The first three contributed to the credibility of solar energy applications whilst only a few of the other pioneers were concerned with the possibilities offered.

The energy crisis in 1973 emphasized the limits of fossil-based energy and aroused a keen interest in potential applications for solar energy, in particular, in photovoltaic conversion.

Major study, development and manufacturing work was triggered off throughout the world, in an effort to create a solar cell industry. RTC, strengthened by its acquired industrial and in-the-field experience, marketed its fourth generation of solar panels in 1975, the BPX 47 A.

Based on the results obtained with this panel, RTC marketed a fifth generation in 1979, using 100 mm diameter silicon cells.

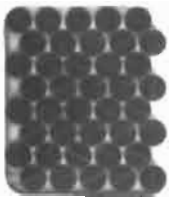
This fifth generation consists of two main types of panels.

— *The BPX 47 B, for supplying a 6 V accumulator, consists of 18 cells and supplies 16.5 W at 8.2 V.*

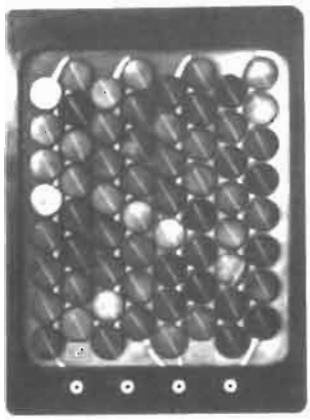
  A 20 cell version is offered for applications without accumulator.

— *The BPX 47 C, for supplying a 12 V accumulator, consists of 36 cells and supplies 33 W at 16.4 V. This panel has a self-supporting structure and a connecting box is incorporated.*

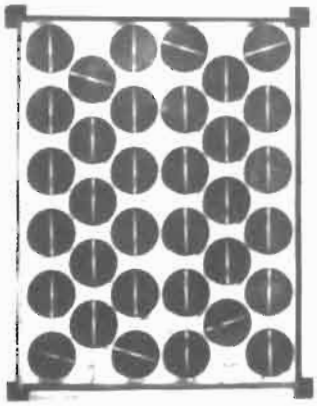
1960



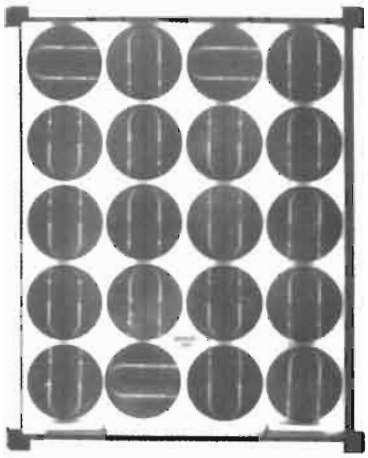
1965
40-30 BPY



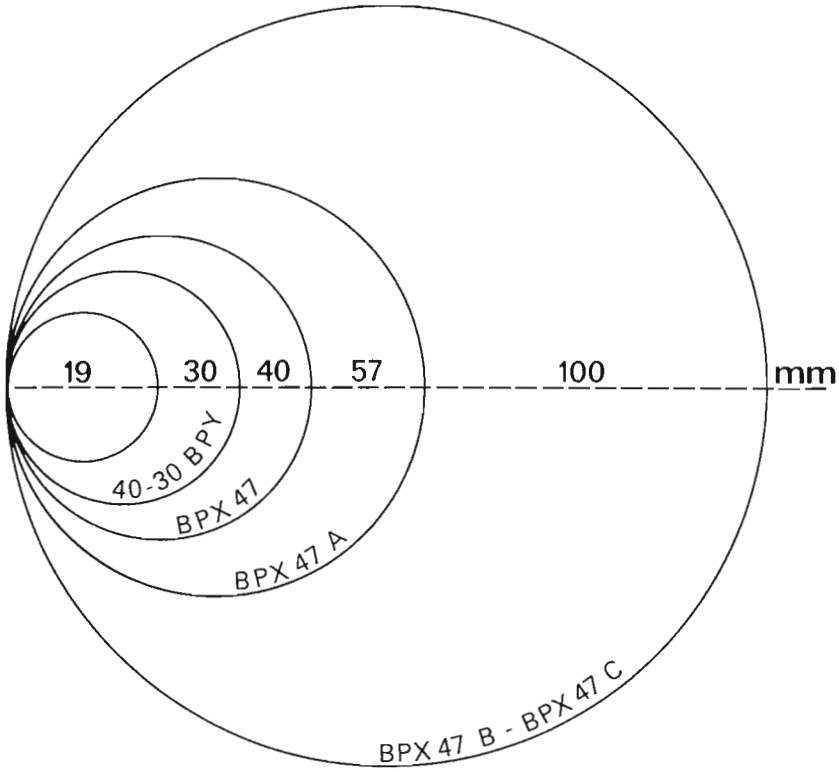
1970
BPX 47

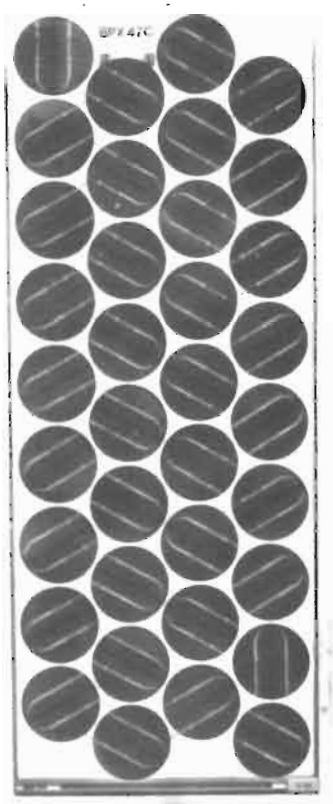


1975
BPX 47 A



1979
BPX 47 B





1979 - BPX 47 C

	Module « Chili » *Chili panel*	40-30 BPY	BPX 47	BPX 47 A	BPX 47 B 18	BPX 47 B 20	BPX 47 C
diamètre cellules *cell diameter* - mm	19	30	40	57	100	100	100
puissance* *power** - W	0,65	2,5	8	11	16,5	18	33
tension* *voltage** - V	3,3	18,2	14,4-28,8	15,5	8,2	9,1	16,4
nombre cellules/module *number of cells/panel*	36	40	64	34	18	20	36

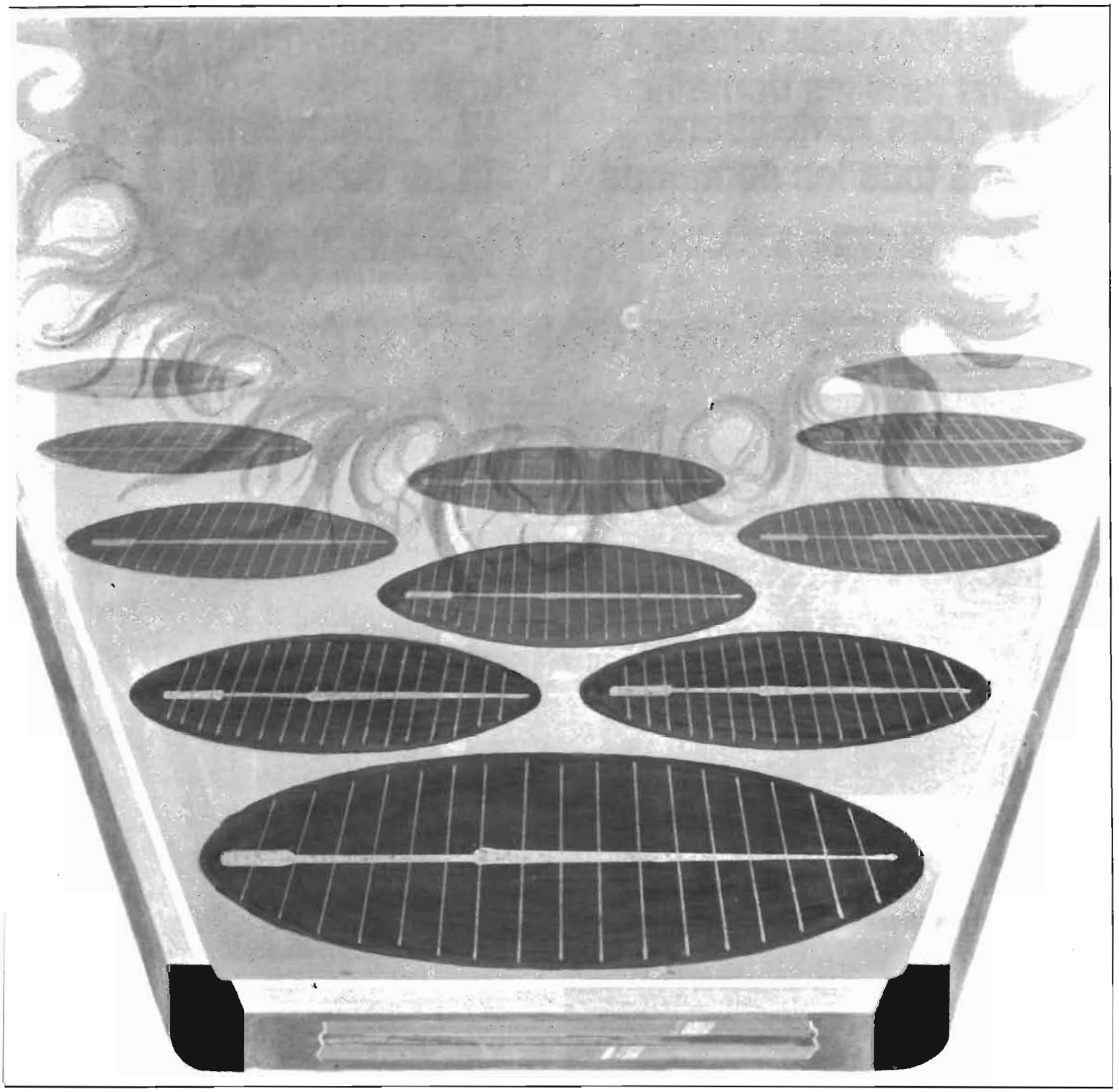
* Caractéristiques électriques au point de fonctionnement optimal, pour un éclairement de 1 kW/m² et une température de cellule de 25°C.
* *Electrical characteristics at optimal functioning point, for a 1 kW/m² solar energy and a cell temperature of 25°C.*

l'encapsulation bi-verre un progrès décisif

Le choix de l'encapsulation bi-verre effectué par RTC en 1974 pour sa quatrième génération de modules solaires a été un élément déterminant pour atteindre la fiabilité requise. La technologie bi-verre est reconnue par les experts pour son adéquation aux problèmes posés par la mise en œuvre des cellules solaires, elle permet un moindre échauffement des cellules, une bonne lavabilité et contribue à l'excellente tenue aux différents agents atmosphériques.

double-glazed panels - a decisive step forward

The adoption of double-glazed panels, made by RTC in 1974 for its fourth generation of solar panels, was a determining factor in reaching the reliability required. The double-glazed technique is recognized by experts as the ideal solution to the problems posed by using solar cells in the field. It provides a reduction in cell heating, improves washability and contributes to the panels' excellent resistance to different atmospheric agents.



IV - des réalisations dans tous les domaines

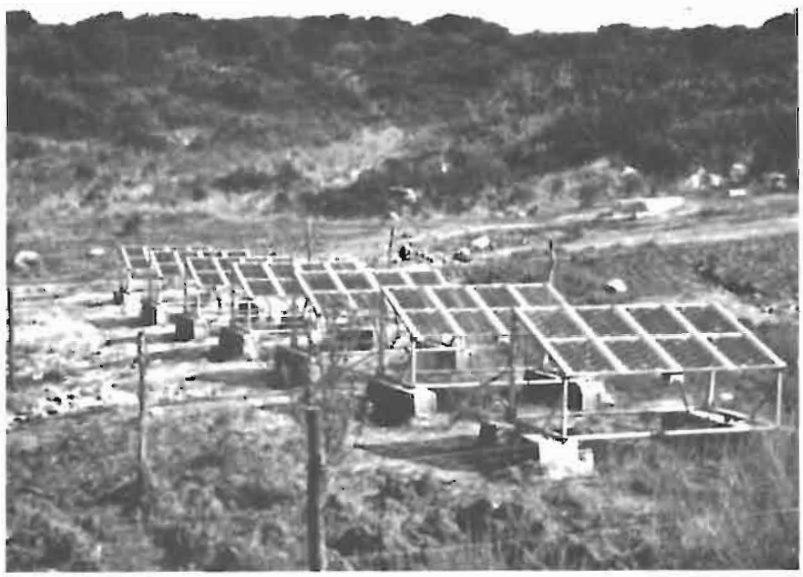
- Télécommunications - Faisceaux hertziens
- Balisage radio-électrique et lumineux
- Télévision scolaire
- Pompage de l'eau
- Navigation de plaisance

. . . . .

IV - achievements in all fields

- *Telecommunications — Micro-wave links*
- *Radio and light beacons*
- *Educational television*
- *Water pumping*
- *Sailing for pleasure*

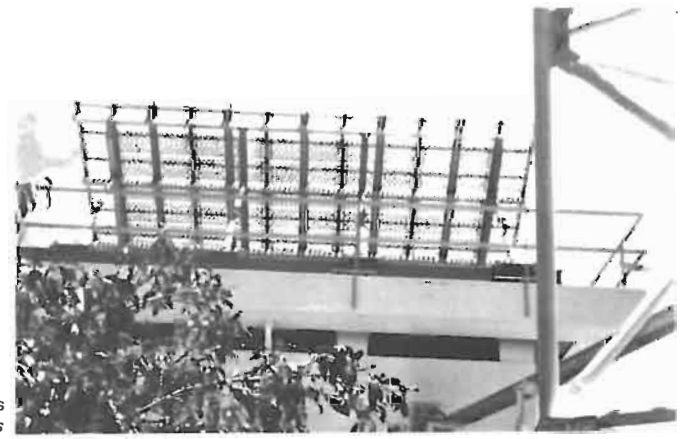
. . . . .



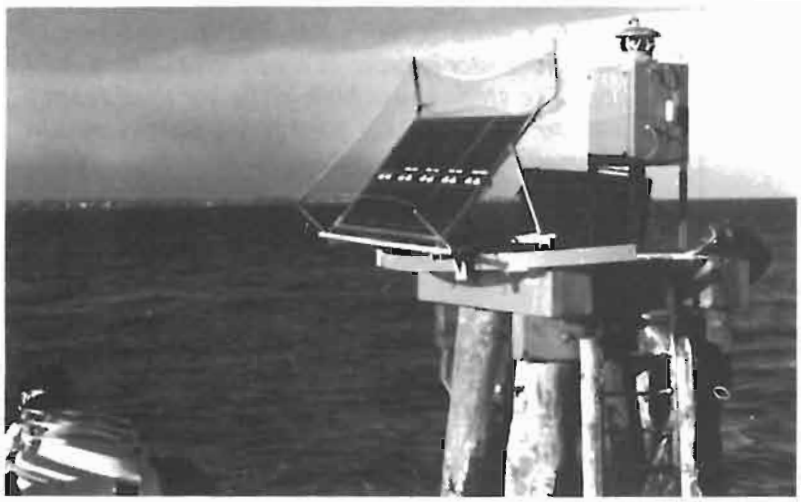
Pompage de l'eau
Water pumping

Réémetteur de Télévision
T.V. transponder

Balisage radioélectrique
Radio beacons

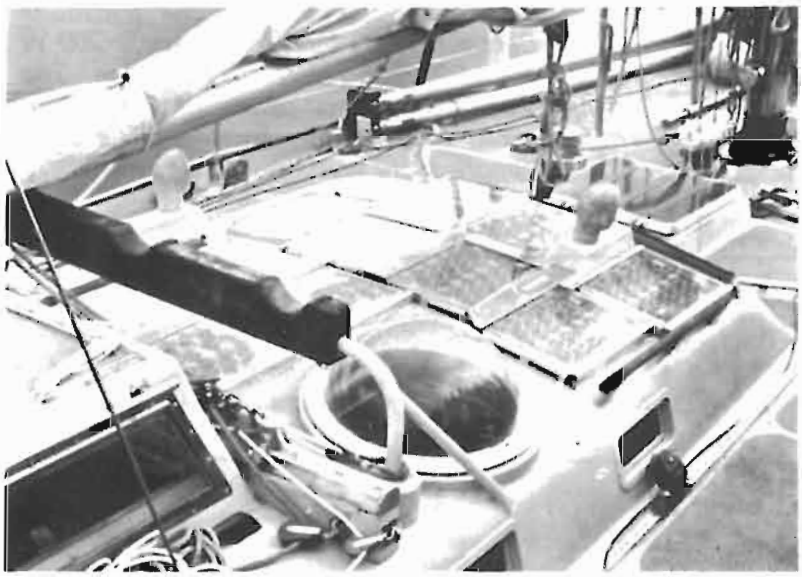


Faisceaux Hertziens
Micro-wave links

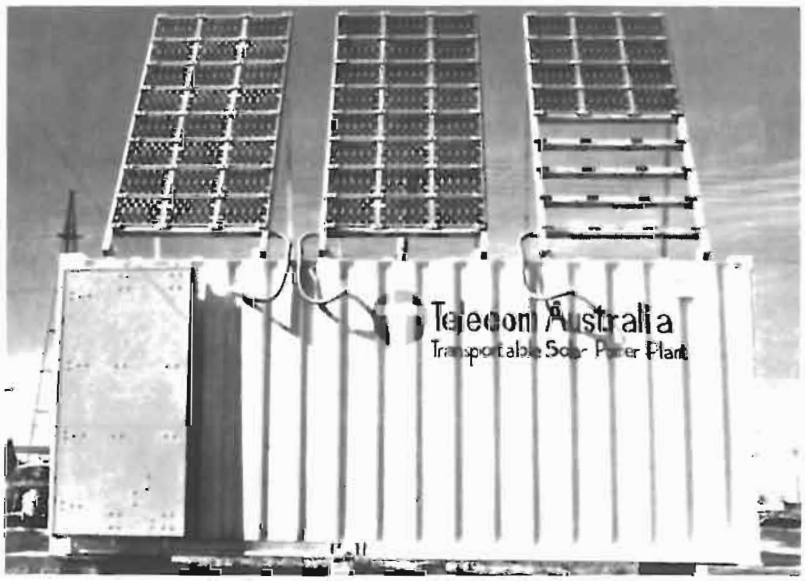


Balisage lumineux
Light beacons

Station expérimentale avec suivi du soleil
Experimental station with sun tracking



Navigation de plaisance
Sailing for pleasure



Faisceaux Hertziens
Micro-wave links

télécommunications

• En 1971, le Centre National d'Etudes des Télécommunications (CNET) a réalisé un générateur solaire expérimental destiné à vérifier sa validité en exploitation. Cette station a été installée dans le sud de la France et a fourni durant son exploitation une dizaine de watts en permanence.

telecommunications

• *In 1971, the National Telecommunications Study Centre (CNET) installed in experimental solar generator in order to check its operating viability. The station was built in the south of France and during operation gave a permanent output of around 10 watts.*

Puissance nominale	12 W	*Nominal power*
Puissance moyenne consommée	12 W	*Average power*
Energie au lieu de l'installation	450 kJ/cm²/an	*Solar energy available*
Nombre de modules	16 BPX 47	*Number of panels*
Capacité de la batterie	48 V - 200 Ah	*Storage battery*

• En 1976, le Centre National d'Etudes des Télécommunications (CNET) a réalisé près de Nice à la Turbie une station AEOROSOLEC de 200 W permanents. Cette station comprend un générateur solaire et une éolienne couplés sur une batterie de stockage. Les modules solaires délivrent en moyenne 110 watts permanents.

• *In 1976, the National Telecommunications Study Centre (CNET) built a permanent 200 W AEOROSOLEC station at Turbie near Nice. The station consists of a solar generator and a windmill coupled to a storage battery. The solar panels supply a 110 watts average power.*

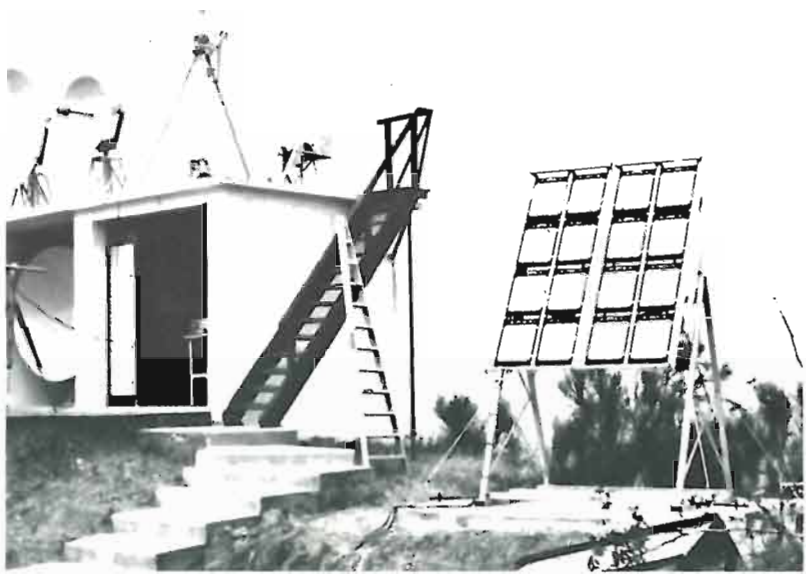
Puissance moyenne consommée	200 W	*Average power*
Energie au lieu de l'installation	450 kJ/cm²/an	*Solar energy available*
Nombre de modules	104 BPX 47 A	*Number of panels*
Capacité de la batterie	48 V - 400 Ah	*Storage battery*

• Depuis Novembre 1978, l'Office National des Télécommunications de Nouvelle Calédonie utilise l'énergie solaire pour l'alimentation d'un faisceau hertzien 24 voies destiné à l'extension de son réseau de Télécommunication, une puissance crête de 1 kW a été installée et permet de relier Nouméa à la ville de WE située sur l'Ile de Lifou.

• *Since November 1978, the National Telecommunications Office of New Caledonia has been using solar energy to supply a 24 channel microwave link designed to extend its telecommunications network. An installation providing 1 kW peak power was installed and enables Nouméa to be linked with the town of WE on the island of Lifou.*

Puissance moyenne consommée	120 W	*Average power*
Energie au lieu de l'installation	650 kJ/cm²/an	*Solar energy available*
Nombre de modules	96 BPX 47 A	*Number of panels*
Capacité de la batterie	24 V - 1600 Ah	*Storage battery*

La Turbie (France)
(Doc. CNET)



Ile de Lifou (N^elle Calédonie)
Island of Lifou (New Caledonia)

(Doc. P & T)

AEROSOLEC - La Turbie (France)
(Doc. CNET)

• Les transmissions UHF-VHF sont limitées à la portée optique, ce qui constitue un frein au développement de la télévision en région montagneuse. L'emploi de réémetteurs disposés suivant les accidents de terrains jusqu'aux localités intéressées résout ce problème. De tels réémetteurs consomment quelques watts seulement, ce qui conduit à des équipements légers alimentés sous faible puissance.
Ci-contre une installation de ce type réalisée à Bogota en Colombie.

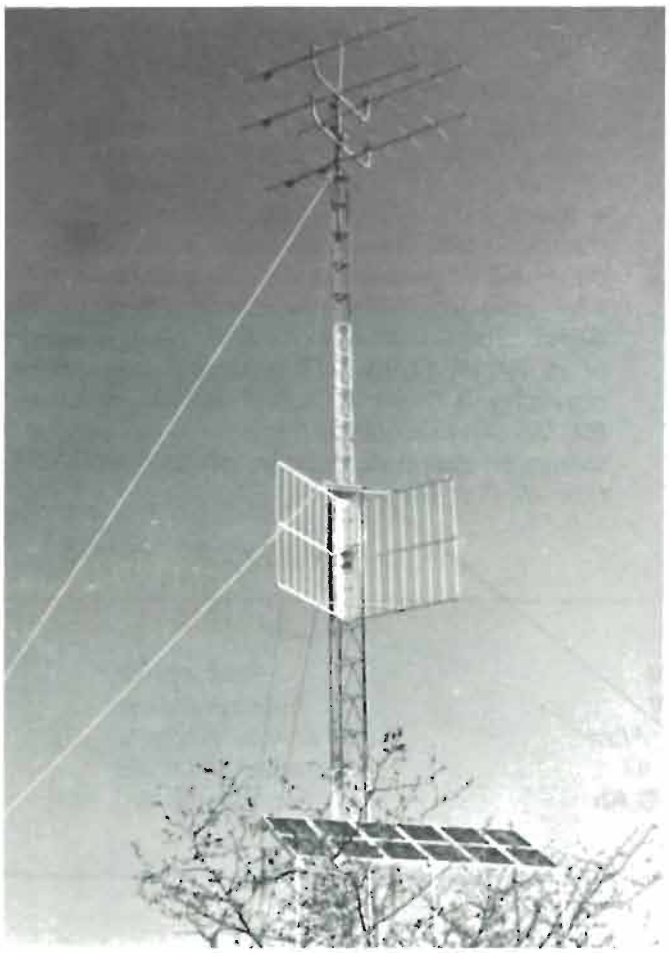
• *UHF-VHF transmissions are limited to optical range, which restricts television development in mountainous areas. This problem can be solved by locating relay transmitters in accordance with the relief of the land. This type of relay transmitter only consumes a few watts, which can be easily supplied by a low power lightweight solar generators.*
An installation of this type, in Bogota in Columbia, can be seen on the opposite page.

Puissance moyenne consommée	11 W	*Average power*
Energie au lieu de l'installation	700 kJ/cm²/an	*Solar energy available*
Nombre de modules	10 BPX 47	*Number of panels*
Capacité de la batterie	24 V - 200 Ah	*Storage battery*

• Une station de réémission automatique de télévision a été mise en service en 1977 au Niger pour assurer la couverture de la ville de Tillabery située en limite de la zone desservie par l'émetteur principal.

• *A television automatic transmission relay station was put into service en 1977 in Niger for transmission to the town of Tillabery situated on the edge of the area served by the main transmitter.*

Puissance moyenne consommée	12 W	*Average power*
Energie au lieu de l'installation	650 kJ/cm²/an	*Solar energy available*
Nombre de modules	12 BPX 47 A	*Number of panels*
Capacité de la batterie	48 V - 80 Ah	*Storage battery*



Tillabery (Niger)
(Doc. TDF)

Bogota (Colombie)
Bogota (Columbia)

(Doc. SERTEM)

• En 1978 la Société T.D.F. (Télé-Diffusion de France) a réalisé dans les Bouches-du-Rhône (France) un réémetteur de télévision permettant au village de Peypin de recevoir la 3e chaîne de télévision (FR3).

• *In 1978 the T.D.F. Company (Télé-Diffusion de France) built a television relay transmitter at Bouches-du-Rhône (France) enabling the village of Peypin to receive the 3rd television programme (FR3).*

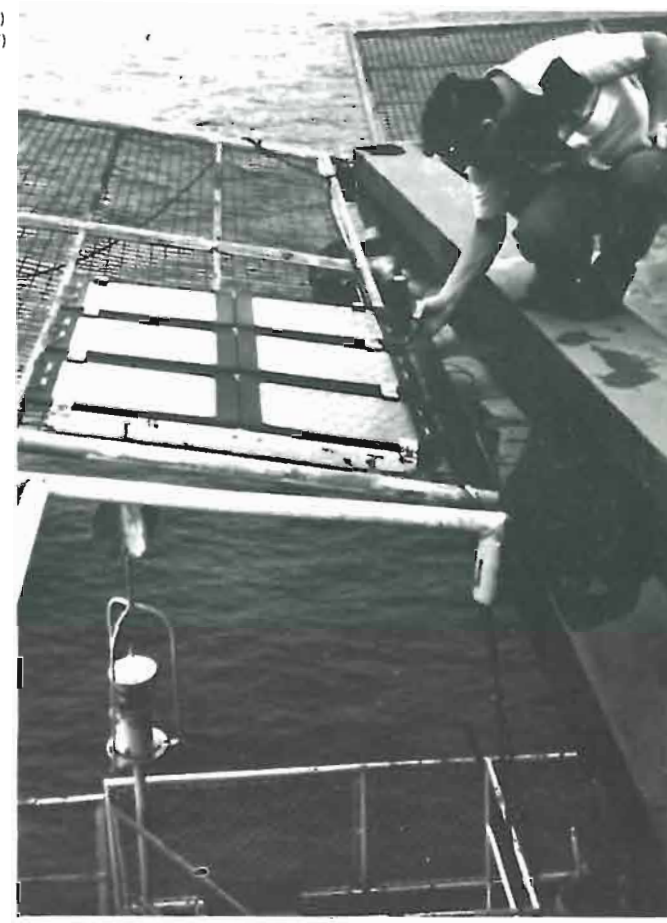
Puissance moyenne consommée	15 W	*Average power*
Energie au lieu de l'installation	400 kJ/cm²/an	*Solar energy available*
Nombre de modules	16 BPX 47 A	*Number of panels*
Capacité de la batterie	24 V - 300 Ah	*Storage battery*

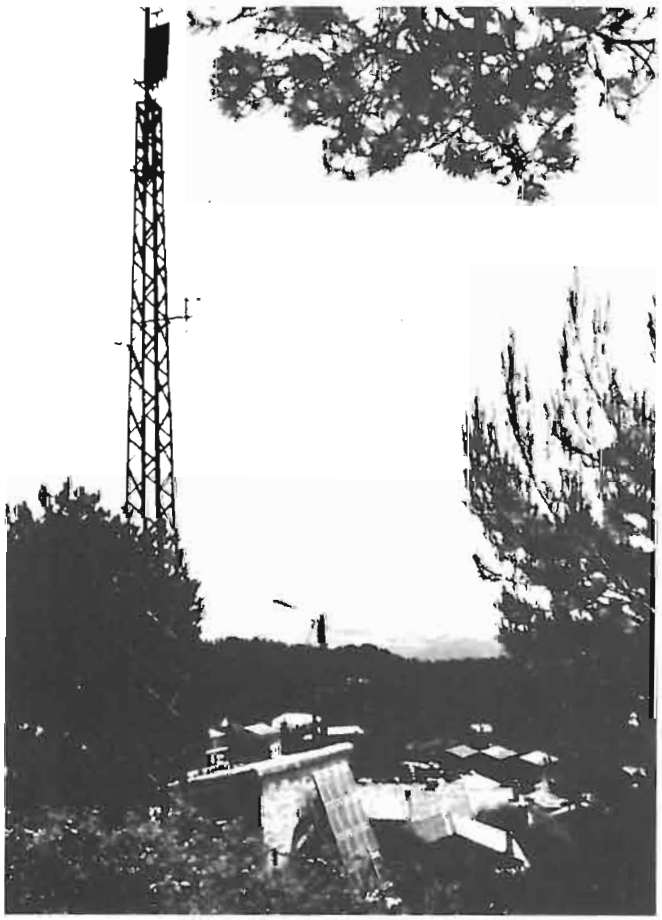
• Depuis 1972, au large du Gabon, des plates-formes de production de pétrole sont équipées de générateurs photovoltaïques assurant l'alimentation de radiotéléphones VHF reliés entre eux et avec Port-Gentil. Les émetteurs-récepteurs ont une puissance de 10 W HF en moyenne. Aujourd'hui, 17 stations sont équipées, correspondant à une puissance crête installée de l'ordre de 800 W. Un exemple de réalisation est donné ci-contre par la station d'Anguille au large de Port-Gentil.

• *Since 1972, off the coast of Gabon, oil production platforms have been equipped with photovoltaic generators supplying the power for VHF radio-telephone links and the link with Port Gentil. The transceivers have an average output of 10 W HF. Today, 17 stations are in service, providing a peak installed power of about 800 W. An example of this type of equipment is shown on the opposite page, at the Anguille station off Port Gentil.*

Puissance crête installée	48 W	*Peak power*
Puissance moyenne consommée	3 W	*Average power*
Energie au lieu de l'installation	800 kJ/cm²/an	*Solar energy available*
Nombre de modules	6 BPX 47	*Number of panels*
Capacité de la batterie	12 V - 120 Ah	*Storage battery*

Port Gentil (Gabon)
(Doc. ELF)





Peypin (France)
(Doc. TDF)

balisage radioélectrique

• Le Service Technique de la Navigation Aérienne (S.T.N.A.), qui a pour charge l'amélioration permanente des moyens de radionavigation, s'est intéressé depuis 1967 aux systèmes de production d'énergie électrique par photopiles. Depuis 1968, une radiobalise d'une portée de 100 km jalonnant la voie aérienne Paris-Bordeaux, située à St-Girons, fonctionne avec des modules solaires.

radio beacons

• *The Air Navigation Technical Service (S.T.N.A.) which is responsible for the continuing improvement of radio navigation systems, has been interested in the production of electrical energy by photovoltaic cells since 1967. Since 1968, a 100 km range radio beacon marking the Paris-Bordeaux air route, located at St-Girons, has been operating with solar panels.*

Puissance crête installée	300 W	*Peak power*
Puissance HF	25 W	*HF power*
Energie au lieu de l'installation	450 kJ/cm²/an	*Solar energy available*
Nombre de modules	120 40-30 BPY	*Number of panels*
Capacité de la batterie	24 V - 200 Ah	*Storage battery*

• L'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne (ASECNA) utilise les générateurs solaires pour l'alimentation de balises HF et VHF. Ainsi, la balise de Lomé au Togo fonctionne depuis 1975 et délivre une puissance HF de 25 W.

• *The Air Navigation Security Agency (ASECNA) uses solar generators for power supply to HF and VHF beacons. The Lomé beacon in Togo has been operating in this way since 1975 and supplies 25 W HF power.*

Puissance crête installée	224 W	*Peak power*
Puissance moyenne consommée	20 W	*Solar energy available*
Energie au lieu de l'installation	600 kJ/cm²/an	*Energy on installation site*
Nombre de modules	28 BPX 47	*Number of panels*
Capacité de la batterie	24 V - 200 Ah	*Storage battery*

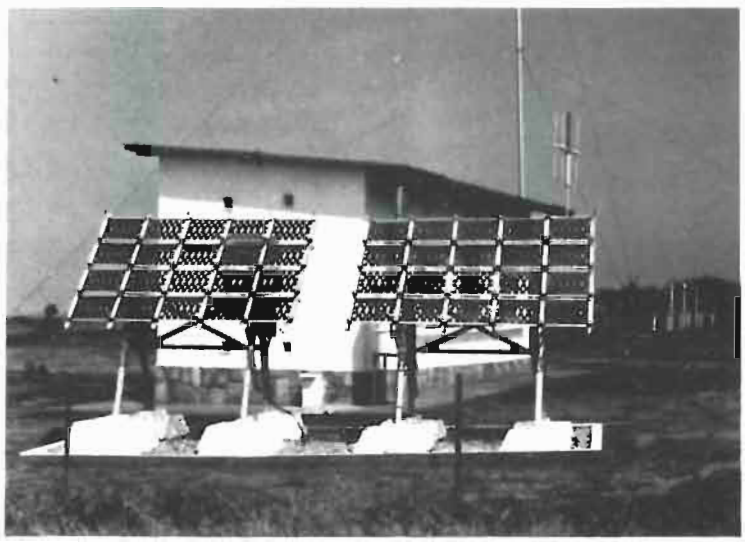
• De même, la Société Française d'Etudes et de Réalisations d'Equipements Aéronautiques (SOFREAVIA) utilise des générateurs solaires pour l'alimentation de balises de navigation aérienne.
C'est le cas de la balise installée sur l'aéroport de Bujumbura au Burundi.

• *In the same way, the Société Française d'Etudes et de Réalisations d'Equipements Aéronautiques (SOFREAVIA) uses solar generator for power supply to air navigation beacons.*
The beacon installed at Bujumbura Airport in Burundi is of this type.

Puissance crête installée	440 W	*Peak power*
Puissance moyenne consommée	45 W	*Solar energy available*
Nombre de modules	40 BPX 47 A	*Number of panels*
Capacité de la batterie	24 V - 400 Ah	*Storage battery*

Saint-Girons (France)
(Doc. S.T.N.A.)

Lome (Togo)
(Doc. ASECNA)



Bujunbura (Burundi)
(Doc. SOFREAVIA)

balisage lumineux

• aérien

L'aéroport de Médine, en Arabie Saoudite, est situé sur un plateau en région montagneuse. Son accès, rendu difficile par la proximité de pitons rocheux, nécessite une signalisation de nuit par balises.

L'alimentation de celles-ci, par ligne électrique, était d'un coût élevé du fait de la friabilité du terrain et de l'éloignement de l'aéroport.

Les sept pitons ont été équipés, en 1973, de balises alimentées par générateurs solaires.

light beacons

• air

Medina Airport in Saudi Arabia is located on a plateau in a mountainous area. Aircraft approach is difficult due to the proximity of rocky peaks, which need to be marked at night with beacons.

Supplying power to the beacons by electric cable would be expensive due to the difficulty of the terrain and the distance from the airport.

In 1973 the seven peaks were equipped with beacons fed by solar generators.

Puissance crête installée	48 W	*Peak power*
Puissance moyenne consommée	6 W	*Average power*
Energie au lieu de l'installation	750 kJ/cm²/an	*Solar energy available*
Nombre de modules	6 BPX 47	*Number of panels*

• en mer

Le système classique d'alimentation en gaz des balises maritimes nécessite une maintenance non négligeable due à l'extinction accidentelle des feux et au remplacement des réserves de gaz.

L'alimentation par générateur solaire permet de s'affranchir de ces contraintes, la seule maintenance étant une remise annuelle à niveau de l'électrolyte.

• sea

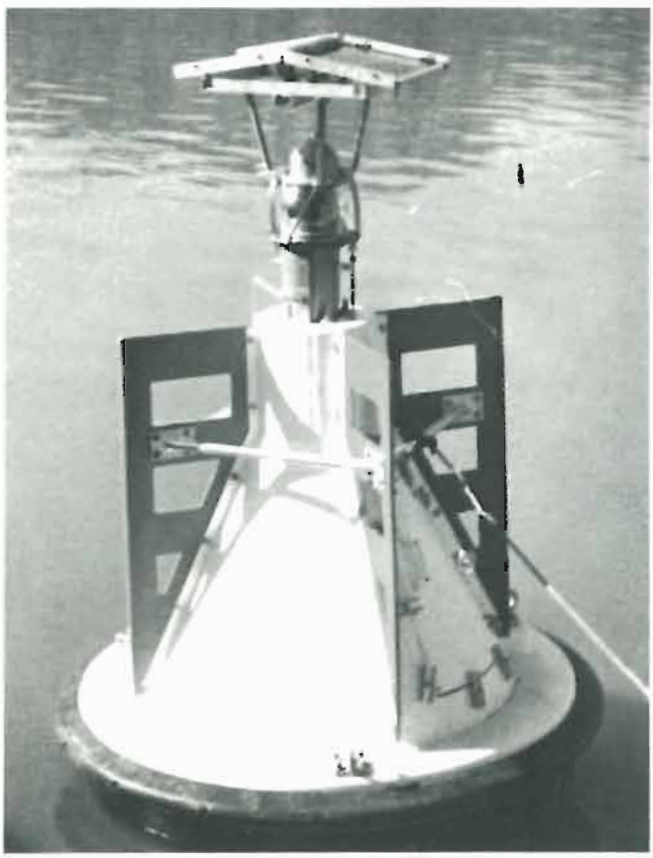
The conventional method of using gas to supply at sea beacons requires quite a lot of maintenance due to accidental extinction of the lights and replacement of gas cylinders.

Power supply from a solar generator eliminates these restrictions, the only maintenance required being an annual topping up of the electrolyte in the storage battery.

Puissance crête installée	22 W	*Peak power*
Puissance moyenne consommée	2 W	*Average power*
Nombre de modules	2 BPX 47 A	*Number of panels*
Capacité de la batterie	12 V - 96 Ah	*Storage battery*

Médine (Arabie Saoudite)
Medina (Saudi Arabia)

(Doc. Saunier Duval)



(Doc. B.B.T.)

télévision scolaire

Les problèmes posés par la scolarisation des populations nécessitent la mise en œuvre, par certains pays, de moyens audiovisuels adaptés, tels que la Télévision et ses accessoires vidéo. La dispersion des installations en des lieux éloignés des réseaux de distribution d'électricité impose l'emploi de sources d'énergie autonomes. Les modules photovoltaïques associés à des batteries d'accumulateur sont bien adaptés à ce type d'application.

• La première classe équipée d'un téléviseur scolaire alimenté par piles solaires a été installée au Niger en 1968.

Depuis, ce sont plusieurs centaines d'installations de ce type qui ont été mises en service.

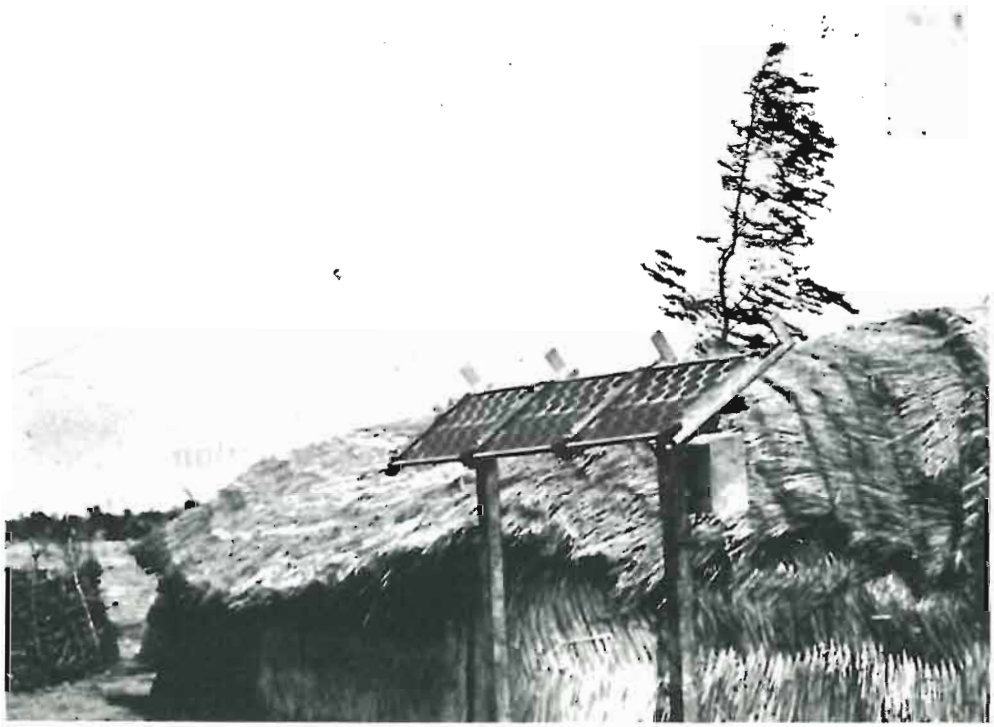
educational television

In certain countries, the problems of educating a population scattered over a wild area can only be solved by using audio-visual methods, such as television and its video accessories. In locations where there is no mains supply, suitable independant power supplies can be obtained from photovoltaic panels used with storage batteries.

• *The first class fitted with educational television supplied from solar batteries was installed in Niger in 1968.*

Since, several hundred installations of this type have been put into service.

Puissance crête installée	33 W	*Peak power*
Puissance nominale du téléviseur	32 W	*Nominal power of T.V. set*
Fonctionnement prévu	25 h/semaine	*Programmed operation*
Energie au lieu de l'installation	700 kJ/cm²/an	*Solar energy available*
Nombre de modules	3 BPX 47 A	*Number of panels*
Capacité de la batterie	36 V - 200 Ah	*Storage battery*



pompage de l'eau

Le pompage de l'eau constitue un secteur privilégié pour l'application des cellules solaires.

Des matériels ont été développés qui permettent de pomper 15 à 100 m³ d'eau par jour jusqu'à environ 25 m de profondeur moyennant l'utilisation de générateurs solaires de 400 W à 1,3 kW crête.

La simplicité de conception des pompes solaires en fait des ensembles robustes, d'entretien réduit, parfaitement adaptés aux conditions de fonctionnement :

- en permanence : en associant cellules solaires et batteries.
- au fil du soleil : le débit est fonction des heures de la journée et de l'ensoleillement.

water pumping

Water pumping is an important application area for solar cells. Equipment has been developed which enables 15 to 100 cubic meters of water per day to be pumped from up to 25 m using solar generators with a 400 W to 1.3 kW peak rating.

The simplicity of design of solar pumps makes them robust units, requiring little maintenance and perfectly suitable for

- *continous operation: used with solar cells accumulators*
- *following the sun: delivery depends on the hours of daylight and sunlight.*

• pour l'irrigation

Station installée en Corse

• for irrigation

Station installed in Corsica

Puissance crête	616 W	*Peak power*
Puissance de la pompe	500 W	*Pump power*
Nombre de modules	56 BPX 47 A	*Number of panels*
Débit	16 m³/jour	*Flow*
Profondeur du puits	25 m	*Well depth*

• hydraulique villageoise

En Afrique

• village water supply

In Africa

Puissance crête	400 W	*Peak power*
Puissance de la pompe	400 W	*Pump power*
Nombre de modules	40 BPX 47 A	*Number of panels*
Débit	20 m³/jour	*Flow*
Profondeur du puits	10 m	*Well depth*

En Lybie à EL MARJ, avec, en plus du pompage, fourniture d'un éclairage d'appoint.

At EL MARJ, in Libya, the solar cells also supply a standby lighting system in addition to pumping.

Puissance crête	792 W	*Peak power*
Puissance de la pompe	600 W	*Pump power*
Nombre de modules	72 BPX 47 A	*Number of panels*
Débit	15 m³/jour	*Flow*
Profondeur du puits	18 m	*Well depth*

Corse
Corsica

(Doc. Guinard)

El Marj (Libye)
El Marj (Libya)

(Doc. Briau)

navigation à voile, de compétition ou de plaisance

L'emploi des modules solaires en mer implique un conditionnement de ces derniers capable de résister à la corrosion marine - l'encapsulation bi-verre des modules RTC est bien adaptée à ce type d'utilisation.

— En 1975, à l'occasion de la course transatlantique Le CAP-RIO DE JANEIRO-DAKAR, dix modules BPX 47 A étaient embarqués à bord du TAT EXPRESS. Ces modules ont permis de réduire la réserve de carburant du TAT EXPRESS, entraînant un gain de poids d'environ 300 kg. Durant cinq mois, ces modules ont subi des contraintes mécaniques et climatiques très sévères sans que leurs caractéristiques électriques varient. Le succès de cette première expérience montrait, d'une part, l'excellente adéquation du BPX 47 A dans son utilisation en atmosphère marine et ouvrait, d'autre part, la voie à l'utilisation du générateur solaire pour la navigation de plaisance.

— En 1976, dans la course transatlantique en solitaire, plusieurs bateaux avaient à leur bord des modules RTC. Parmi eux on peut citer :

- le PENDUICK VI : 6 modules BPX 47 A assuraient l'alimentation du pilote automatique,
- le CLUB MEDITERRANEE : 56 modules BPX 47 A assuraient la consommation de bord.

— Les modules BPX 47 A équipaient également certains bateaux qui ont participé à la course du Rhum.

— De manière beaucoup plus simple, un plaisancier peut, au moyen de modules solaires, maintenir sa batterie de bord chargée. Ceci évite tout montage et démontage de la batterie pour la recharger et élimine d'autre part tout risque de sulfatation.

sailing for competition or pleasure

The use of solar cells at sea requires that they are designed to resist marine corrosion - the RTC double-glazed panel is highly suitable for this type of use.

— In 1975, during the CAPETOWN-RIO-DAKAR Transatlantic race, 10 BPX 47 A panels were fitted on board the TAT EXPRESS. These cells enabled the TAT EXPRESS fuel reserve to be reduced, resulting in a weight-saving of about 300 kg. For five months, although these cells were subjected to very severe mechanical and climatic stresses, there was no alteration in their electrical characteristics. The success of this first experiment shows the excellent quality of the BPX 47 A in a marine environment and also the suitability of the solar generator for pleasure sailing craft.

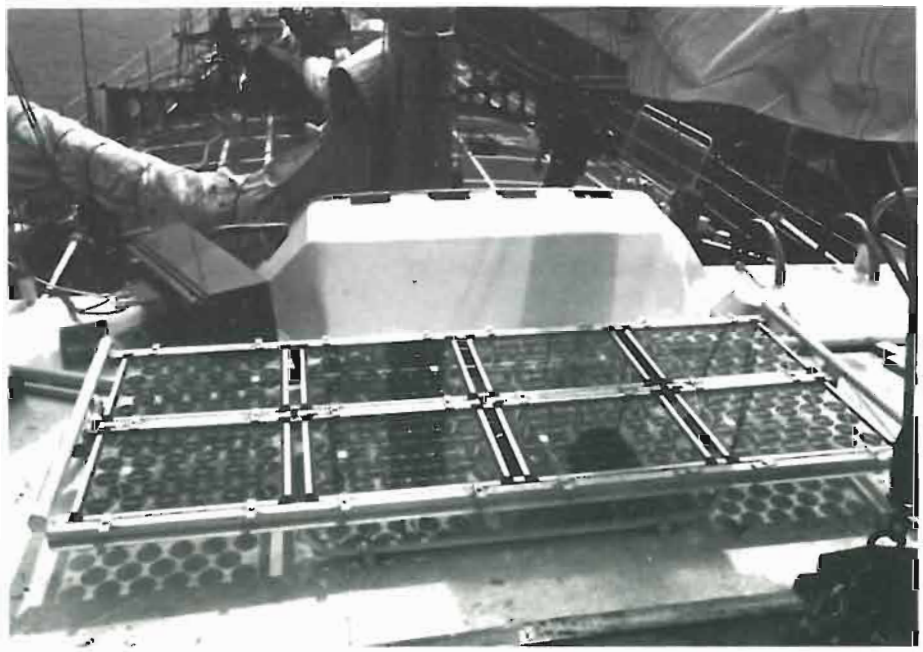
— In 1976, in the single-handed Transatlantic race, several boats carried RTC modules on board. Among them were:

- *the PENDUICK VI: six BPX 47 A panels used to supply the automatic pilot,*
- *the CLUB MÉDITERRANÉE: fifty-six BPX 47 A panels for on-board consumption.*

— The BPX 47 A panels were also fitted to certain boats taking part in the Rum race (Course du Rhum).

— In a much more simple fashion, a pleasure boat may keep its on-board accumulator battery charged using solar cells. This saves fitting and removal of the battery for recharging and also eliminates all risk of sulphation.

Voilier « Club Méditerranée »
Sailing-boat « Club Mediterranée »



télémesure

surveillance de volcans

Dans le but de prévoir les éruptions volcaniques, des stations de magnétométrie permettant la surveillance de volcans ont été équipées de modules solaires.

Ces stations permettent de mettre en évidence les effets volcanomagnétiques dûs à des phénomènes de changements de pressions et de températures des roches. Les résultats sont transmis par télémesure à une centrale d'enregistrement.

Station réalisée par le Commissariat à l'Energie Atomique en 1978 en Indonésie dans le centre de JAVA au volcan MERAPI.

telemetry

vulcano surveillance

In order to forecast volcanic eruptions, magnetometry stations for the surveillance of vulcanoes have been fitted with solar cells.

The stations enable evidence to be obtained of volcano-magnetic activity due to changes in the pressures and temperatures of the rocks. The results are transmitted by telemetry to a recording station.

The station built by the Atomic Energy Commission in 1978 in Indonesia in the centre of Java on the Merapi volcano.

Puissance moyenne consommée	8 W	*Average power*
Energie au lieu de l'installation	700 kJ/cm²/an	*Solar energy available*
Nombre de modules	6 BPX 47 A	*Number of panels*
Capacité de la batterie	12 V - 90 Ah	*Storage battery*

courants marins

Dans le cadre d'un projet d'études des courants marins sur la côte occidentale australienne, le « Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization » a choisi des modules solaires BPX 47 A pour l'alimentation de bouées dérivantes qui envoient les informations concernant leur localisation et différents paramètres de l'environnement au satellite NIMBUS VI. 12 bouées sont actuellement en service afin notamment d'étudier le chemin parcouru par les larves de homards et de langoustes.

détection d'incendies

L'organisme « Australian Capital Territory Brush Fireboard » a choisi les générateurs solaires pour l'équipement de stations de détection d'incendies. La tour principale de liaison radio est située à 1 600 m sur le mont Tennant en milieu isolé où aucune source conventionnelle d'énergie n'est disponible.

Celle-ci reçoit en provenance des postes de surveillance, fixes ou montés à bord de véhicules, les informations permettant de détecter un éventuel incendie.

Le générateur solaire assure tout au long de l'année l'énergie électrique nécessaire et une parfaite autonomie.

sea currents

For a project for the study of sea currents along the Western coast of Australia, the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization chose BPX 47 A solar cells for providing power supplies for drifting buoys which transmit the information concerning their location and the different environmental parameters to the NIMBUS VI satellite. 12 buoys are currently in service, in particular, for the study of the route taken by the larvae of lobsters and crayfish.

fire detection

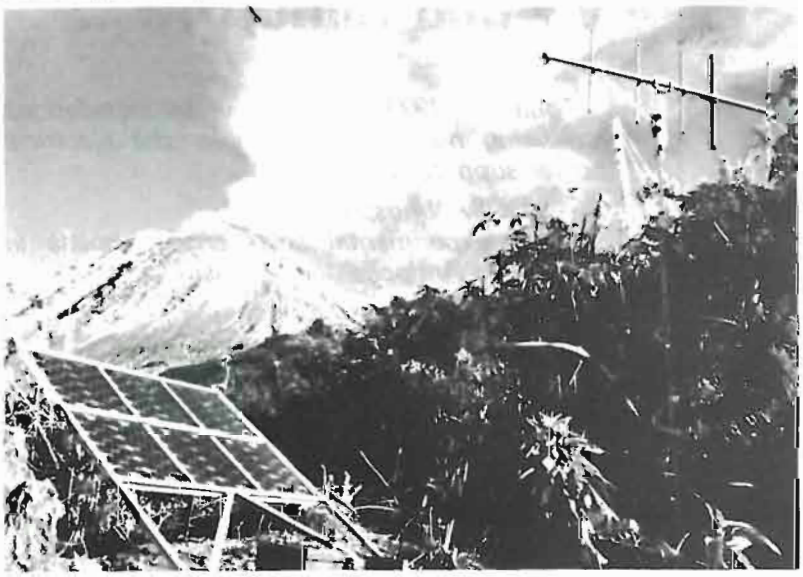
The Australian Capital Territory Brush Fireboard organisation has chosen solar generators for equiping fire detection stations. The main radio link tower is located at 1 600 m on Mount Tennant in an isolated location where no conventional source of power is available.

It receives information on fire locations from fixed or vehicle surveillance posts. The solar generator supplies the electrical power required and gives perfect autonomy throughout the year.

Côte occidentale Australienne
Western coast of Australia

Volcan Merapi (Java)
Merapi volcano (Java)

(Doc. CEA-LETI-GAMCIS)



Mont Tennant (Australie)
Mount Tennant (Australia)

V - et demain...

Aujourd'hui, en 1979, des installations de puissance plus importantes sont en cours de réalisation. Citons, par exemple, l'alimentation électrique :

— de l'hôpital de SAN au Mali,
— d'une maison solaire expérimentale à Sophia Antipolis.

D'autres applications sont en projet :

— protection des pipe-lines contre les courants telluriques,
— liaisons téléphoniques sol-train,
— signalisation ferroviaire.

V - and tomorrow...

Today, in 1979, higher powered installations are being built. For example, the electrical power supplies to:

— the SAN hospital in Mali,
— an experimental solar energy house in Sofia Antipolis.

Other applications are planned:

— protection of pipelines against seismic disturbances,
— ground-train telephone links
— railway signalling.

DATA SHEETS

TERRESTRIAL SOLAR MODULE

Module for direct conversion of solar energy into electrical energy. The module contains 36 series-connected solar cells of 100 mm diameter, moulded in transparent resin and mounted between two glass plates. The transparent structure ensures low heating by solar radiation, which maintains efficiency.

The module, suitable for use under severe environmental conditions, is mounted in a rigid aluminium self-supporting frame.

QUICK REFERENCE DATA

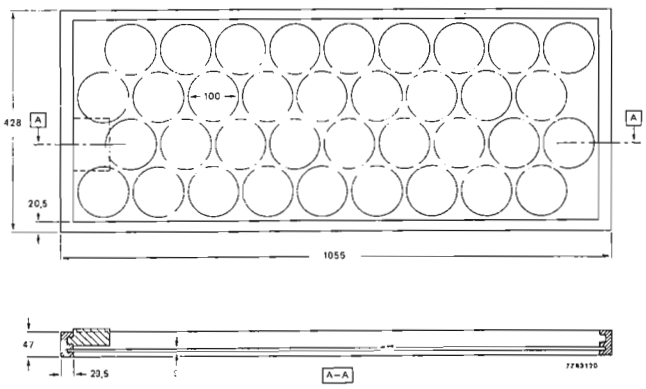
At E_e = 1 kW/m² (irradiance from the sun at sea level) and T_j = 25 °C:

Optimum output power at 16,4 V	P_{Lopt}	typ.	33,0 W
Output voltage at optimum operation	V_{opt}	typ.	16,4 V
Output current at optimum operation	I_{opt}	typ.	2,01 A
Dimensions	1055 mm x 428 mm x 47 mm		

MECHANICAL DATA

Dimensions in mm

Fig. 1 See also Fig. 8.



Self-supporting structure

Connection box dimensions: 98 mm x 64 mm x 35 mm

Mass: typ. 9,5 kg

RATINGS

Limiting values in accordance with the Absolute Maximum System (IEC 134)

Storage temperature	T_{stg}		−40 to + 85 °C
Operating junction temperature	T_j	max.	100 °C

CHARACTERISTICS at E_e = 1 kW/m² (irradiance from the sun at sea level; A.M. 1,5)

Junction temperature	T_j	=	0	25	60 °C
Optimum output power	P_{Lopt}	typ.	37	33	27,6 W
Output voltage at optimum operation	V_{opt}	typ.	19	16,4	14,3 V
Output current at optimum operation	I_{opt}	typ.	1,95	2,01	1,93 A
Open-circuit voltage	V_{oc}	typ.	22,8	21,2	18,4 V
Short-circuit current	I_{sc}	typ.	2,07	2,10	2,14 A

Temperature coefficient of open-circuit voltage	$-dV_{oc}/dT$	typ.	72 mV/°C

Typical operation BPX47C/36 coupled to a 12 V battery

Irradiance from the sun	E_e	=	1 kW/m²
Operating voltage (12 V nominal lead-acid battery; end of charge voltage 13,5 V; + 0,8 V for blocking diode)	V	=	14,3 V

At an irradiance of 1 kW/m² the cell temperature rise is 15 °C

At an ambient temperature of 45 °C (cell temperature = 45 + 15 = 60 °C) the module can supply a current of 1,83 A to the load.

ENVIRONMENTAL TESTS

The modules are subjected to the following IEC tests and some additional tests:

Test	In accordance with	Conditions	
Cold	IEC 68-2, test Ab	Temperature: −40 °C, duration 16 h	
Rapid change of temperature	IEC 68-2-14, test Na	Low temperature:	−40 °C
		High temperature:	+ 85 °C
		Number of cycles:	10
		Duration of exposures:	30 min
Dry heat	IEC 68-2-2, test Bb	Temperature:	+ 85 °C
		Duration:	16 h
Composite temperature/humidity cyclic test	IEC 68-2-38, test Z/AD	10 cycles, + 25 °C, + 65 °C, −10 °C	

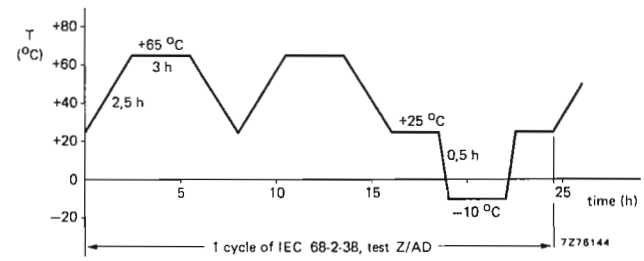


Fig. 2.

Salt mist	IEC 68-2-11, test Ka	Temperature:	+ 35 °C
		Duration:	48 h
Wind	–	Pressure equivalent to an air velocity of 280 km/h	
Sand blown	AIR 7.303		
Frost with water	–	High temperature:	+ 25 °C
		Low temperature:	−40 °C
		Duration:	16 h

MOUNTING INSTRUCTIONS

1. The module is equiped with mounting screw positions.
2. Installation should allow at leats a 0,5 m space behind the panel to permit a free circulation of air for cooling.
3. The panel should not be installed above hot objects such as roofs.
4. Diode protection is imperative in the series connection of a chain of panels to prevent voltage inversion due to partial shadowing effects.

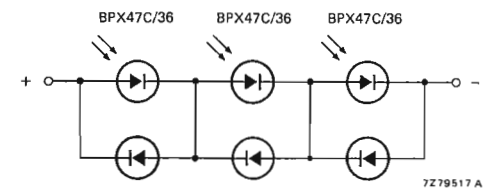


Fig. 3.

5. If series-connected chains are joined in parallel and diode protected, a matrix interconnection is necessary.

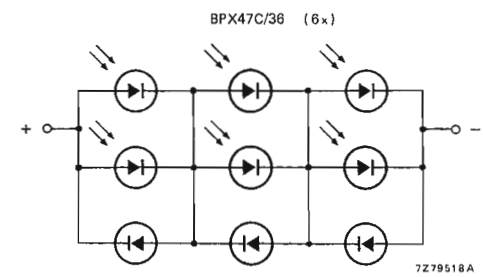


Fig. 4.

6. A charge regulator containing a series protection diode must be used when connecting panels to a lead-acid battery.

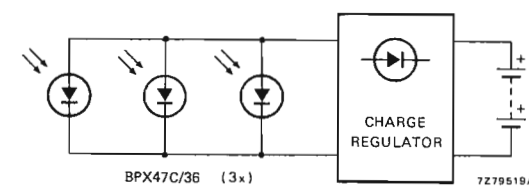


Fig. 5.

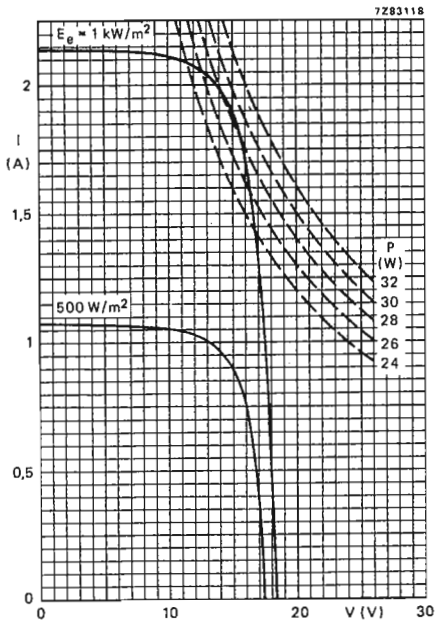


Fig. 6 T_j = 60 °C; typical values.

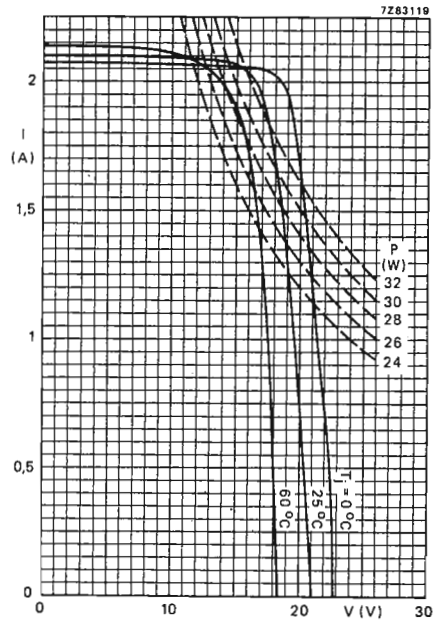
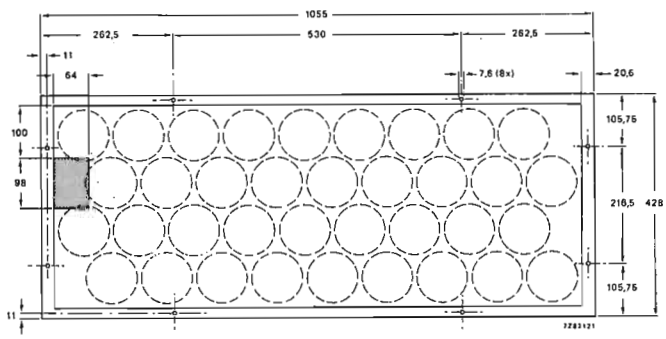


Fig. 7 E_e = 1 kW/m² (A.M. 1); typical values.



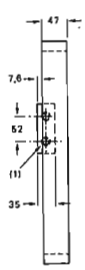


Fig. 8 Right side view.
(1) Feed-through for cable of 11 mm thickness (PG11).

TERRESTRIAL SOLAR MODULE

Module for direct conversion of solar energy into electrical energy. The module contains 18 series-connected solar cells of 100 mm diameter, moulded in transparent resin and mounted between two glass plates. The transparent structure ensures low heating by solar radiation, which maintains efficiency.

The module is suitable for use under severe environmental conditions.

QUICK REFERENCE DATA

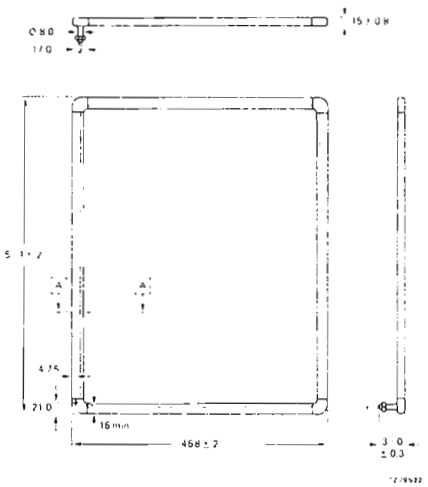
At E_e = 1 kW/m² (irradiance from the sun at sea level) and T_j = 25 °C:

Optimum output power at 8,2 V	P_{Lopt}	typ.	16,5 W
Output voltage at optimum operation	V_{opt}	typ.	8,2 V
Output current at optimum operation	I_{opt}	typ.	2,01 A
Dimensions	584 mm x 468 mm x 15 mm		

MECHANICAL DATA

Dimensions in mm

Fig. 1 For mechanical detail see Fig. 2.



Panel thickness	15 mm
Cable:	
length	2 m *
diameter	5,5 mm
collar diameter	17 mm
core diameter (two wires)	1,8 mm
Polarity indications:	
black	−
red	+
Mass	4,0 kg

* Voltage drop 150 mV/m.

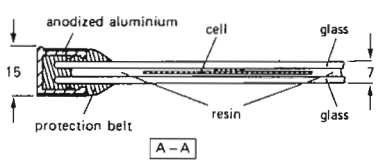


Fig. 2.

RATINGS

Limiting values in accordance with the Absolute Maximum System (IEC 134)

Storage temperature	T_{stg}		−40 to + 85 °C
Operating junction temperature	T_j	max.	100 °C

CHARACTERISTICS at E_e = 1 kW/m² (irradiance from the sun at sea level; A.M. 1)

Junction temperature	T_j	=	0	25	60 °C
Optimum output power	P_{Lopt}	typ.	18,5	16,5	13,7 W
Output voltage at optimum operation	V_{opt}	typ.	9,5	8,2	7,1 V
Output current at optimum operation	I_{opt}	typ.	1,95	2,01	1,93 A
Open circuit voltage	V_{oc}	typ.	11,4	10,5	9,2 V
Short-circuit current	I_{sc}	typ.	2,07	2,10	2,14 A

Temperature coefficient of open circuit voltage	$-dV_{oc}/dT$	typ.	36 mV/°C

Typical operation BPX47B/18 coupled to a 6 V battery

Irradiance from the sun	E_e	=	1 kW/m²
Operating voltage (6 V nominal lead-acid battery; end of charge voltage 6,6 V; + 0,8 V for blocking diode)	V	=	7,4 V
At an irradiance of 1 kW/m² the cell temperature rise is			15 °C

[illegible] (15 °C/cell temperature: 15 + 15 = 60 °C) the module can supply a current of 1,83 A to the load.

ENVIRONMENTAL TESTS

The modules are subjected to the following IEC tests and some additional tests:

Test	In accordance with	Conditions	
Cold	IAC 68-2-1, test Ab	Temperature: −40 °C, duration: 16 h	
Rapid change of temperature	IEC 68-2-14, test Na	Low temperature:	−40 °C
		High temperature:	+ 85 °C
		Number of cycles:	10
		Duration of exposures:	[illegible]
Dry heat	IEC 68-2-2, test Bb	Temperature:	[illegible]
		Duration:	1[illegible]
Composite temperature/humidity cyclic test	IEC 68-2-38, test Z/AD	10 cycles, + 25 °C, + 65 °C, −10 °C	

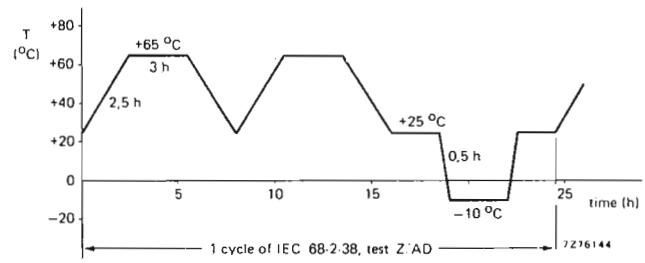


Fig. 3.

Salt mist	IEC 68-2-11, test Ka	Temperature:	+ 35 °C
		Duration:	48 h
Wind	–	Pressure equivalent to an air velocity of 280 km/h	
Sand blown	AIR 7.303		
Frost with water	–	High temperature:	+ 25 °C
		Low temperature:	−40 °C
		Duration:	16 h

MOUNTING INSTRUCTIONS

1. The solar panel should be mounted in a metal frame in such a way that only its four metal sides are used for clamping and not the rubber corners. The panel should be electrically insulated from the mounting frame to prevent corrosion.
2. Installation should allow at least a 0,5 m space behind the panel to permit a free circulation of air for cooling.
3. The panel should not be installed above hot objects such as roofs.
4. Diode protection is imperative in the series connection of a chain of panels to prevent voltage inversion due to partial shadowing effects.

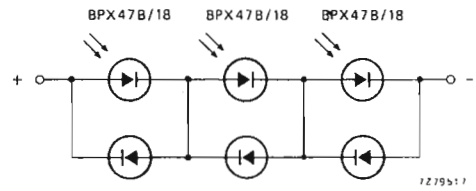


Fig. 4.

5. If series-connected chains are joined in parallel and diode protected, a matrix interconnection is necessary.

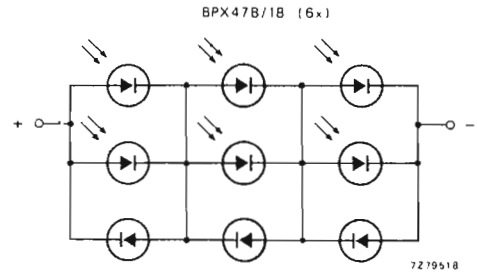


Fig. 5.

6. A charge regulator containing a series protection diode must be used when connecting panels to a lead-acid battery.

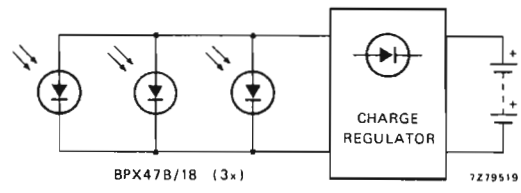


Fig. 6.

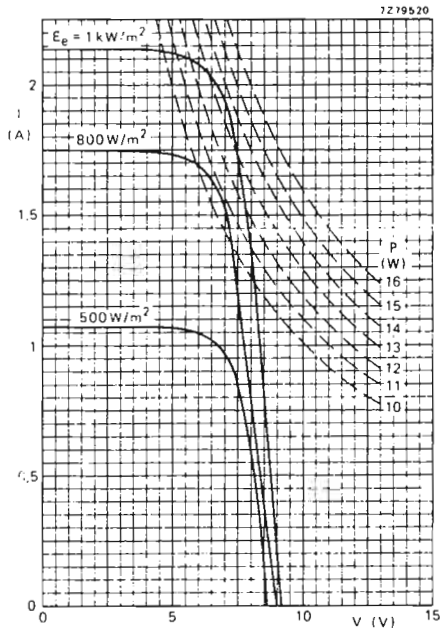


Fig. 7 T_j = 60 °C; typical values.

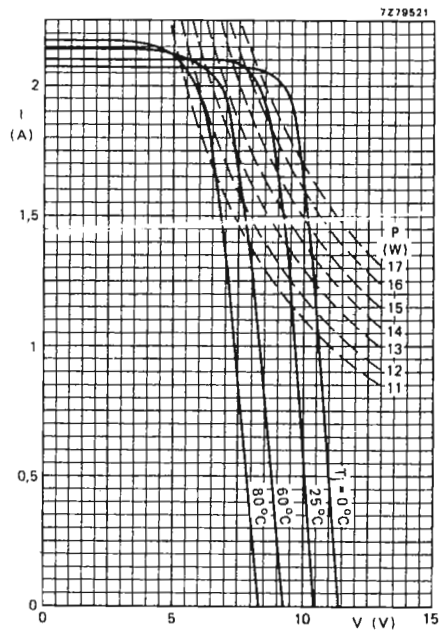


Fig. 8 E_e = 1 kW/m² (A.M. 1); typical values.

BPX47A

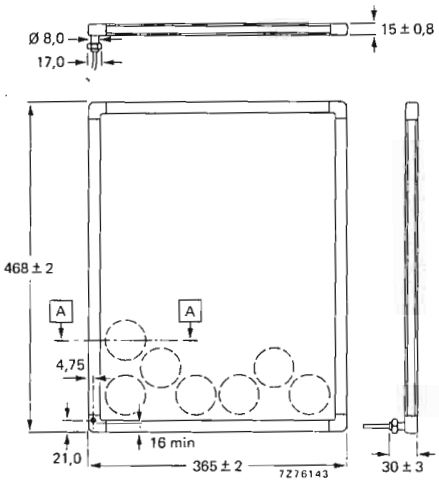
TERRESTRIAL SOLAR MODULE

Module for direct conversion of solar energy into electrical energy. The module contains 34 series-connected solar cells of 57 mm diameter, moulded in transparent resin and mounted between two glass plates. The transparent structure ensures low heating by solar radiation, which maintains efficiency.
The module is suitable for use under severe environmental conditions.

QUICK REFERENCE DATA				
At E_e = 1 kW/m² (irradiance from the sun at sea level) and 25 °C:				
Optimum power output at 15,5 V	P_{Lopt}	typ.	11	W
Output voltage at optimum operation	V_{opt}	typ.	15,5	V
Output current at optimum operation	I_{opt}	typ.	700	mA
Dimensions	468 mm x 365 mm x 15			mm

MECHANICAL DATA

Dimensions in mm

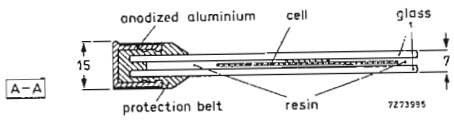


Panel thickness 15 mm

Cable
- length 1 m
- diameter 5,5 mm
- collar diameter 17 mm
- core diameter (two wires) 1,8 mm

Polarity indication:
- black = −
- red = +

Mass: 2,4 kg



RATINGS Limiting values in accordance with the Absolute Maximum System (IEC 134)

Storage temperature	T_{stg}	−40 to +85 °C

CHARACTERISTICS at E_e = 1 kW/m² (irradiance from the sun at sea level; A.M. 1)

Cell temperature	T_{cell}		0	25	60	°C
Optimum output power	P_{Lopt}	typ.	12	11	9,7	W
Voltage	V_{opt}	typ.	18	15,5	14,5	V
Current	I_{opt}	typ.	665	645 700	680	mA
Open-circuit voltage	V_{oc}	typ.	22,2	20,5	18,2	V
Short-circuit current	I_{sc}	typ.	700	720	740	mA
Temperature coefficient of open-circuit voltage	dV_{oc}/dT			typ.	−74	mV/°C
Temperature coefficient of short-circuit current	dI_{sc}/dT			typ.	0,64	mA/°C

TYPICAL OPERATION BPX47A coupled to a 12 V battery

Irradiance from the sun	E_e	1 kW/m²
Operating voltage (12 V nominal lead-acid battery; end-of-charge voltage 13,5 V; +0,8 V for blocking diode)	V	14,3 V

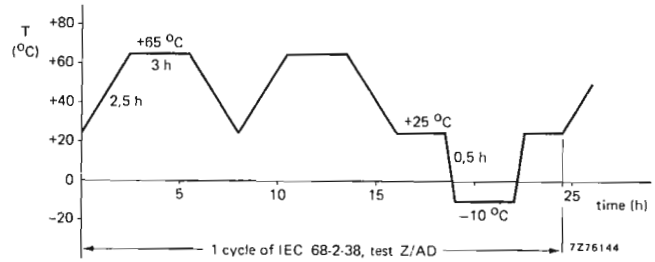
At an irradiance of 1 kW/m² the cell temperature rise is 15 °C

At an ambient temperature of 45 °C (cell temperature = 45 + 15 = 60 °C) the module can supply a current of 680 mA to the load.

ENVIRONMENTAL TESTS

The modules are subjected to the following IEC tests and some additional tests:

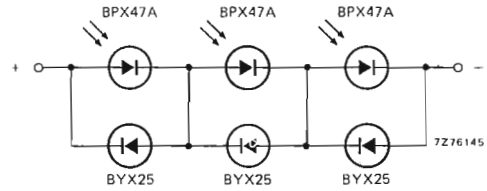
Test	In accordance with	Conditions		
Cold	IEC68-2-1, test Ab	Temperature: −40 °C, duration: 16 h		
Rapid change of temperature	IEC68-2-14, test Na	Low temperature:	−40	°C
		High temperature:	+85	°C
		Number of cycles:	10	
		Duration of exposures:	30	min
Dry heat	IEC68-2-2, test Bb	Temperature:	+85	°C
		Duration:	16	h
Composite temperature/humidity cyclic test	IEC68-2-38, test Z/AD	10 cycles, +25 °C, +65 °C, −10 °C		



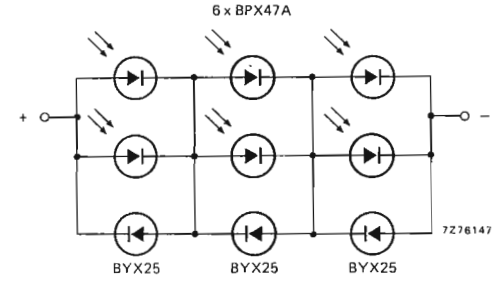
Salt mist	IEC68-2-11, test Ka	Temperature:	+35	°C
		Duration:	48	h
Wind	–	Pressure equivalent to an air velocity of 230 km/h		
Sand blown	AIR 7,303			
Frost with water	–	High temperature:	+25	°C
		Low temperature:	−40	°C
		Duration:	16	h

MOUNTING INSTRUCTIONS

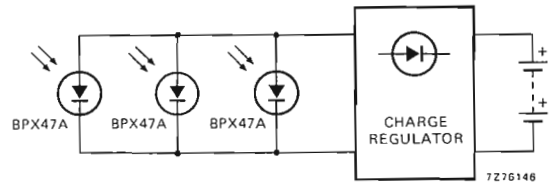
1. The solar panel should be mounted in a metal frame in such a way that only its four metal sides are used for clamping and not the rubber corners. The panel should be electrically insulated from the mounting frame to prevent corrosion.
2. Installation should allow at least a 50 cm space behind the panel to permit a free circulation of air for cooling.
3. The panel should not be installed above hot objects such as roofs.
4. Diode protection is imperative in the series connection of a chain of panels to prevent voltage inversion due to partial shadowing effects.



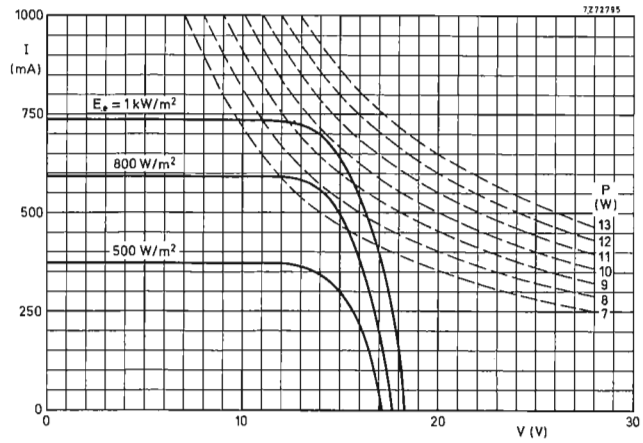
5. If series-connected chains are joined in parallel and diode protected, a matrix interconnection is necessary.

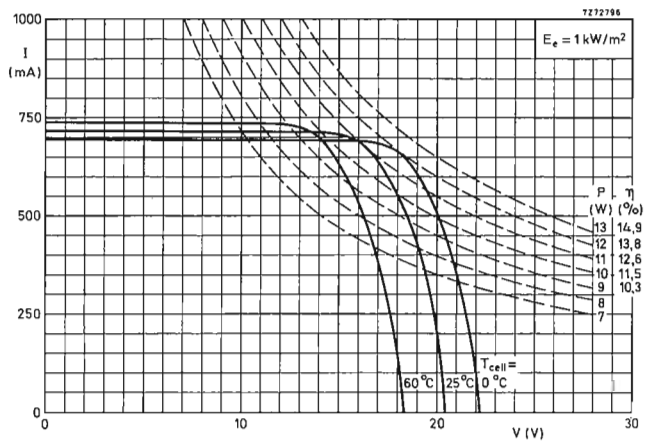


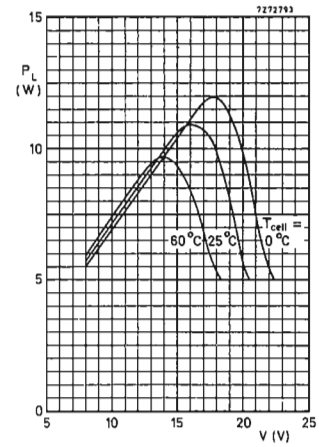
6. A charge regulator containing a series protection diode must be used when connecting panels to a lead-acid battery.

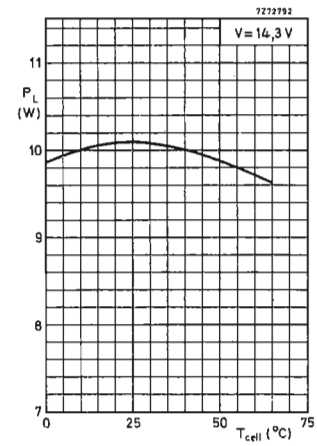


BPX47A


7Z72785
1000
I
(mA)
750
500
250
0
0
10
20
30
V (V)
E_e = 1 kW/m²
800 W/m²
500 W/m²
P
(W)
13
12
11
10
9
8
7


7Z72796
1000
I
(mA)
750
500
250
0
0
10
20
30
V (V)
E_e = 1 kW/m²
P L η
(W) (%)
13 14,9
12 13,8
11 12,6
10 11,5
9 10,3
8
7
T_{cell} =
60 °C
25 °C
0 °C


7Z72793
15
P_L
(W)
10
5
0
5
10
15
20
25
V (V)
T_{cell} =
60 °C
25 °C
0 °C


7Z72792
V = 14,3 V
11
P_L
(W)
10
9
8
7
0
25
50
75
T_{cell} (°C)

Lire 8.000

(7.246)